

L'instrumentation du viaduc de Millau

Monitoring design and implementation of the Millau viaduct

Claude Servant

2, rue Hélène Boucher – 93337 Neuilly-sur-Marne

claude.servant@eiffage.com

MOTS CLÉS

Accéléromètres – Capteurs de déplacement – Essais de chargement – Essais dynamiques – Essais statiques – Inclinomètres – Jauges de contraintes – Température - Vibrations

RÉSUMÉ

Le système de suivi et d'instrumentation du viaduc de Millau a été conçu par une équipe d'experts déjà impliqués dans les études de la structure de l'ouvrage. Avec le maître d'ouvrage, ils ont fixé des objectifs et des priorités. Un spécialiste de l'instrumentation des structures fut chargé des spécifications techniques, de l'évaluation des matériels et des coûts. La gestion des données ainsi que la surveillance et la maintenance du système ont également été étudiées. On décrit ici d'abord le programme de suivi, ensuite sont présentés les résultats mesurés pendant les différentes phases de la construction et de la réception ainsi que pendant les premières années d'exploitation de l'ouvrage.

ABSTRACT

Monitoring of the Millau viaduct was designed by a team of experts already involved with the structural design of the viaduct. With the owner they identified objectives and priorities. An expert in structures monitoring was in charge of the technical specifications, implementation and costs evaluation. Data management, supervision and maintenance of the monitoring system were studied as well. The monitoring program and the results measured during the construction and service phases are presented.



Figure 1 : Le viaduc

1. PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE (FIG. 1)

Le viaduc de Millau est un ouvrage de 400 millions d'euros financé et réalisé par le groupe EIFFAGE dans le cadre d'une concession. Sa filiale, la Compagnie Eiffage du Viaduc de Millau (CEVM), est concessionnaire de l'ouvrage pour 75 ans.

Ce viaduc multi-haubané exceptionnel d'une longueur de 2 460 m et d'une hauteur de 343 m au sommet des pylônes, est le dernier maillon de l'autoroute A75 Clermont-Ferrand/Béziers (Fig. 2).

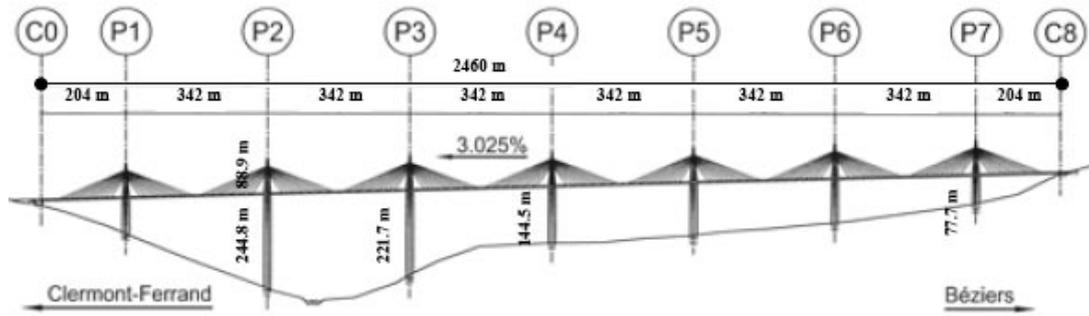


Fig. 2 : Vue longitudinale du viaduc

De telles caractéristiques confèrent à cet ouvrage le record du monde de longueur des ponts à haubans à travées multiples ainsi que celui de hauteur de piles (P2 : 245m et P3 : 221 m).

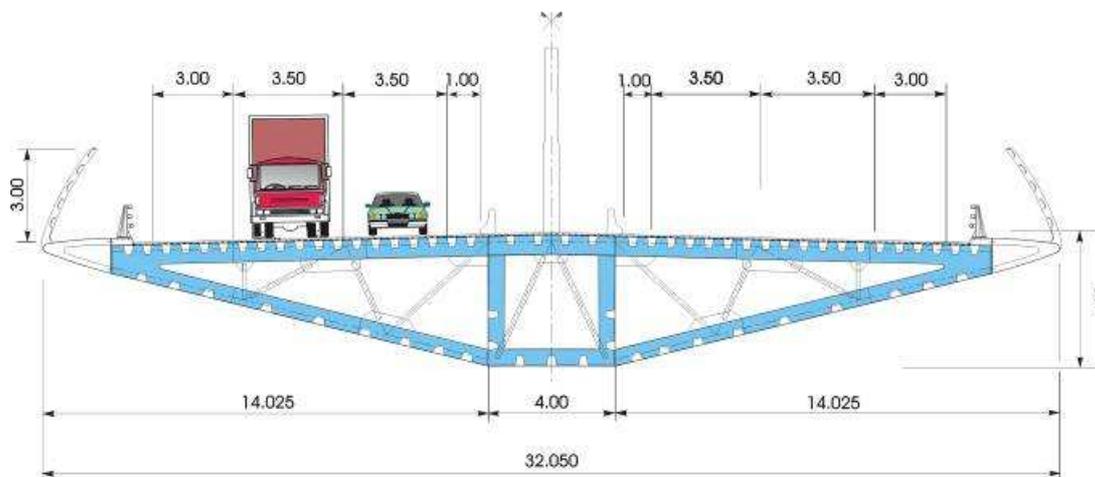


Fig. 3 : Coupe transversale du viaduc

Le profil en travers de l'autoroute est du type 2 x 2 voies de circulation encadrées chacune par une bande d'arrêt d'urgence de 3 m et une bande dérasée de gauche de 1 m. (Fig. 3). La largeur totale du tablier est de 27,75 m. L'ouvrage est également équipé de barrières lourdes et d'écrans de protection des usagers contre le vent latéral.

Les piles constituées d'un fût unique en forme de caisson dans sa partie basse qui se dédouble dans sa partie supérieure précontrainte reposent sur un système de fondation semi-profonde constitué de quatre puits de gros diamètre (5 m maxi).

Le tablier est constitué d'un caisson métallique trapézoïdal de 4,20 m de hauteur à l'axe avec un platelage supérieur orthotrope constitué de tôles de 12 à 14 mm d'épaisseur.

Le tablier repose sur toutes les piles par l'intermédiaire d'appareils d'appuis sphériques qui sont cloués sur les piles à l'aide de câbles de précontrainte.

Chaque travée est supportée par l'intermédiaire de haubans ancrés de part et d'autre des pylônes (onze haubans par nappe axiale disposés en semi-éventail et espacés de 12,51 m).

Les pylônes de 87 m de hauteur totale sont métalliques et en forme de « Y » renversé orienté longitudinalement et dans le prolongement des fûts dédoublés des piles.

Le tablier métallique de l'ouvrage a été réalisé par phases successives d'assemblage et de lancement à partir des plateformes aménagées derrière les culées C0 et C8 (1743 m côté sud et 717 m côté nord).

Les panneaux qui constituent les caissons centraux ont été fabriqués dans l'usine d'Eiffel à Lauterbourg puis transportés à Fos-sur-Mer où ils ont été assemblés et enfin acheminés sur le chantier par convois exceptionnels (longueur maxi 22 m ; poids maxi 90 tonnes). Chaque partie latérale est constituée de quatre panneaux et d'un caisson de rive (longueurs maxi 24 m ; poids maxi 40 tonnes) livrés sur le chantier par convois exceptionnels.

Les opérations de lançage sont terminées par le clavage des extrémités de porte-à-faux au milieu de la travée P2-P3 surplombant le Tarn. Toutes les grandes travées, excepté la travée P2-P3, comportent une palée provisoire située à mi-travée (hauteur maxi 173 m – Fig. 4).



Figure 4 : Lançage du tablier côté nord

2. LES OBJECTIFS DU SUIVI DE L'OUVRAGE

Les objectifs de suivi de l'ouvrage sont précisés par l'autorité concédante dans l'annexe 10 du " Cahier des Charges de la Concession ", qui prévoit pour l'ouvrage une " durée d'utilisation de projet " de 120 ans. Cette durée de 120 ans s'entend comme étant la durée pendant laquelle le viaduc doit être utilisé comme prévu, en faisant l'objet de l'entretien et de la maintenance escomptée sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des réparations majeures.

Dans ce document, le suivi est divisé en trois phases : construction, réception et surveillance à long terme. Les objectifs du suivi diffèrent ainsi d'une phase à l'autre.

Pendant la construction, des contrôles sont nécessaires pour vérifier la géométrie et les déplacements de l'ouvrage, principalement lors des opérations de lançage du tablier. Ce sont surtout des techniques topographiques qui sont utilisées, elles permettent de vérifier que le comportement du viaduc reste conforme aux prévisions des calculs.

Au moment de la réception de l'ouvrage, c'est son état de référence qui est enregistré. Cet état sert de " point zéro " pour la surveillance à long terme.

La surveillance à long terme en phase d'exploitation comporte trois aspects : contrôle des paramètres spécifiques liés à la sécurité des véhicules et de leurs passagers, contrôle du comportement du viaduc et contrôle du vieillissement de l'ouvrage.

3. LA CONCEPTION DU SUIVI

Les mesures de contrôle qui correspondent à des buts précis, ont été débattus par les experts en instrumentation, le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage. Après accord sur les priorités, des spécifications techniques détaillées furent rédigées par les différents experts (Fig. 5).

La gestion des données et l'analyse des mesures doivent être simples et faciles, cela veut dire que les données et mesures peuvent être analysées par des spécialistes, ou même des non-spécialistes, souvent dans des délais très brefs, et selon des critères clairs. Après traitement des données, la première analyse s'effectue par comparaison aux valeurs de référence, les écarts acceptables étant prédéfinis. En cas de besoin, une analyse détaillée est ensuite entreprise par un groupe d'ingénieurs.

Dans l'esprit d'un maître d'ouvrage, le suivi est souvent envisagé pour le très long terme. Dans le cas du viaduc de Millau, il était prévu une première période de trois années de suivi en continu. Au bout de cette période, les connaissances du comportement de l'ouvrage, particulièrement en cas de tempête, devaient être complètes. Le suivi était donc prévu d'être revu à ce moment-là en fonction de cette expérience et en tenant compte de la véritable durée de vie de l'instrumentation.

La gestion de milliers de données exige un soin tout particulier. Les données ont été organisées au début du suivi : codes, formats d'enregistrement, formats de fichier, noms de fichier, traitement des données. Les enregistrements et fichiers de données sont structurés pour être exportés directement dans un tableur plutôt que dans une base de données, pour une plus grande efficacité. Le programme de surveillance et de suivi présenté ci-après a fait l'objet avant sa mise en application d'une validation par les experts de l'autorité concédante.

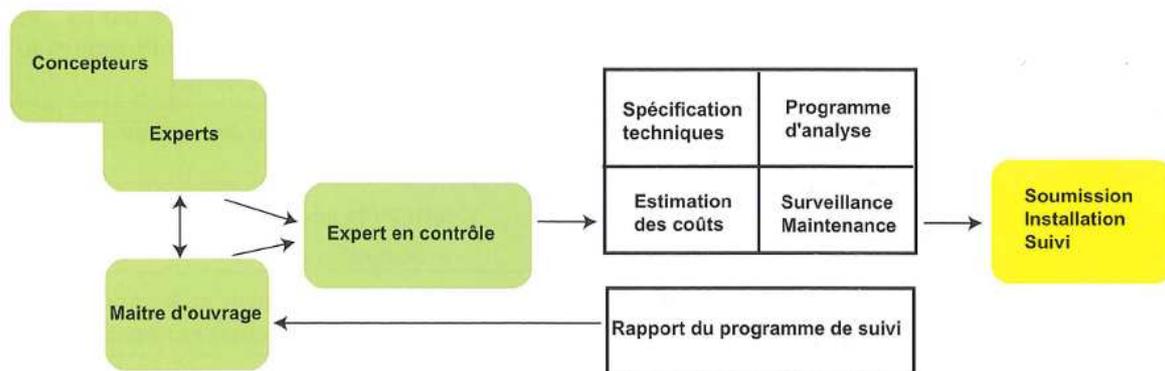


Figure 5: Suivi du viaduc – Organisation

4. LE PROGRAMME DE SUIVI

Le suivi du viaduc (Tableau 1) a été volontairement séparé des systèmes de contrôle conçus pour la sécurité du trafic. Le système de suivi de la structure n'a pas de fonction de vigilance ou d'alerte. Dans la phase d'exploitation, la mesure de la vitesse du vent qui peut déclencher la fermeture du viaduc utilise le même faisceau à fibres optiques mais transite par une voie spécifique.

La plupart des instruments de suivi – capteurs, modules d'acquisition de données, réseau – sont des dispositifs industriels. Sauf pour le comportement du béton des fondations, il n'a pas été fait appel à des fibres optiques en raison de leur mauvaise réponse en fréquence et de leur coût ; il leur a été préféré des extensomètres à base longue : une barre en Invar avec un capteur de déplacement attaché à la structure.

Les matériels utilisés pour surveiller la circulation comprennent des anémomètres à coupelles, des girouettes, des détecteurs de verglas, des dispositifs servant à mesurer la visibilité, la température et l'hygrométrie, la hauteur de la neige ou de l'eau de pluie, ainsi que la température et l'état de la chaussée.

Mesure de...	Au moyen de	Nombre	Dans le but de...
<i>Phase de construction</i>			
Déformation du béton des fondations (semelle P2)	Extensomètres à fibres optiques	8	Mesurer l'impact des contraintes de cisaillement à la suite de l'exothermie et du retrait du béton des semelles
Géométrie de la structure	Station totale et prismes optiques	141	Contrôler la position des repères
Position du coffrage glissant	GPS différentiel (DGPS)	1	Contrôler la position des coffrages
Déplacement vertical et rotation des fondations	Nivellement optique à haute précision de 4 repères	4 cibles / semelle	Comparer le tassement et la rotation des fondations sous la charge croissante de la pile dans le temps
<i>Mesure de...</i>			
<i>Phase de construction</i>			
Déformation thermique des piles (P2 et P6)	Capteurs de température dans le béton	103	Comparer les déplacements horizontaux des piles aux résultats d'une simulation numérique
<i>Lançage du tablier</i>			
Vitesse et orientation vent	Anémomètre à ultrasons	1 + 1 de secours	Mesurer la vitesse du vent, la comparer aux seuils d'alerte et de vigilance
Position du tablier	Station totale et DGPS	1	Comparer les positions théoriques et réelles du tablier
Déformation des âmes du tablier (patch-loading)	Capteurs de déplacement sur dispositif fixe et mobile	36	Mesurer les déplacements de l'âme entre deux diaphragmes d'un segment de tablier se déplaçant sur une pile ou palée
Mouvements dynamiques du tablier et du pylône	Accéléromètres	7 sur tablier, 1 sur pylône	Contrôler les accélérations pendant le lancement
Déplacement en temps réel et torsion des têtes de palée	Télémètres laser	5	Contrôler les déplacements des palées provisoires
Déplacement en temps réel des têtes de pile	Dispositif d'alignement au laser	1 par pile	Contrôler les déplacements des têtes de pile pendant le lancement (avec seuil d'alerte)
Efforts dans les haubans	Cellule de force	4	Contrôler les variations d'efforts dans les haubans pendant le lancement
<i>Phase d'exploitation</i>			
Température		27	Mesurer la température des tôles en acier pour déterminer son impact sur le tablier. Calculer les corrections thermiques à appliquer aux simulations
Vitesse, direction et turbulence du vent	Anémomètres à coupelles et à ultrasons	Ultrasons 1 A coupelles 2	Mesurer la vitesse et la direction du vent pour déterminer son impact sur pylônes, haubans, tablier et piles
Rotations	Inclinomètres	Pylônes 2 Piles 2	Mesurer les rotations de la structure
Déformation	Extensomètres	52	Mesurer la déformation du béton des piles, essentiellement pour déterminer le fluage du béton (P2, P7)
Vibrations	Accéléromètres	Tablier 6 Pylônes 3 Haubans 3	Mesurer l'amplitude et la fréquence des oscillations et vibrations (effets du vent)

Tableau 1 : Instrumentation du viaduc

5. LE SYSTÈME D'ACQUISITION DES DONNÉES – SURVEILLANCE ET MAINTENANCE

Les capteurs électroniques sont reliés par fibre optique aux modules d'acquisition des données. Le tout converge sur des modules numériques liés au bus central utilisé pour l'automatisation des processus (liaison Ethernet). La surveillance du réseau de suivi et l'enregistrement des mesures sont effectués par un ordinateur connecté au réseau. Seuls certains fichiers de données sont analysés, selon le programme prédéfini, et à la suite d'événements exceptionnels, tels des tempêtes.

Les données sont transmises aux experts techniques chargés de l'analyse : par exemple effet de la température, impact du vent sur le tablier ou les haubans, fluage du béton. Ces sujets ont été listés et détaillés dans la « Notice de Gestion technique de l'ouvrage ».

La surveillance du réseau de suivi fait partie de la surveillance générale du viaduc : les équipes qui travaillent à la gare de péage s'en chargent. Elles assurent également une partie de la maintenance. Il s'agit là d'une vision nouvelle de l'organisation du suivi, mais on sait par expérience que cette option fonctionne mieux qu'une surveillance uniquement à distance.

6. LE SUIVI PENDANT LA CONSTRUCTION

Le suivi des positions et des déplacements du viaduc en phase de lancement fait appel très largement à la dernière technologie géodésique : DGPS avec capteurs à liaison radio sur des points fixes sur site, et station totale avec prismes optiques vissés dans le béton des piles ou dans les parties métalliques des pylônes. De nombreux prismes utilisés lors des contrôles des phases de construction sont conçus pour rester en place pour le suivi de l'ouvrage en phase d'exploitation (Fig. 6).

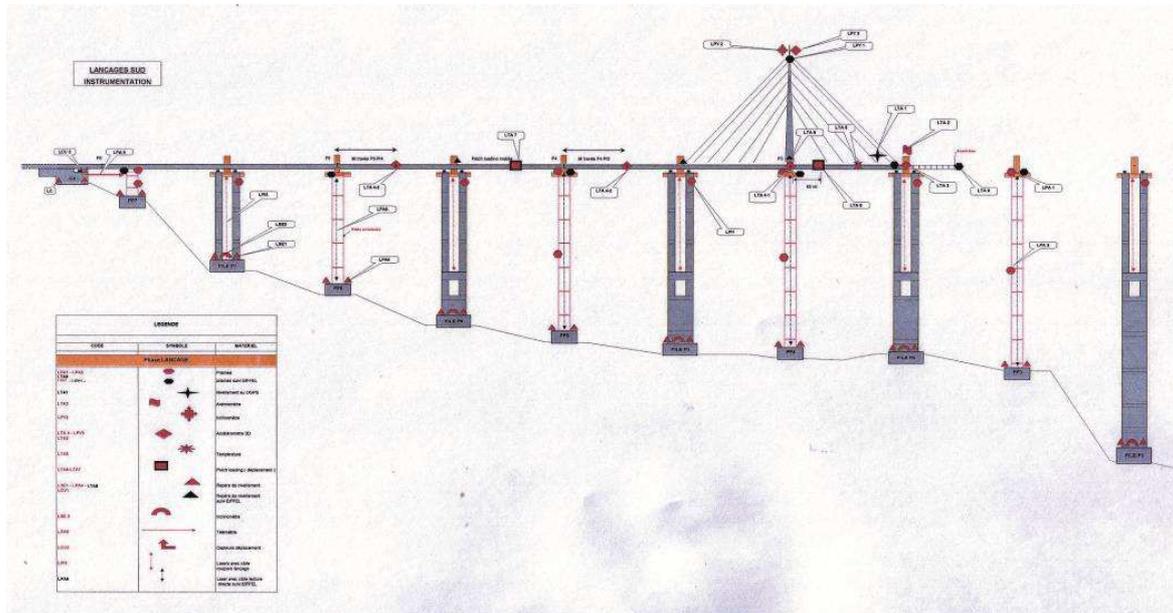


Figure 6 : Instrumentation du viaduc pendant sa construction

Les figures suivantes (n° 7 à 12) reflètent certaines données enregistrées pendant la construction et le lancement.

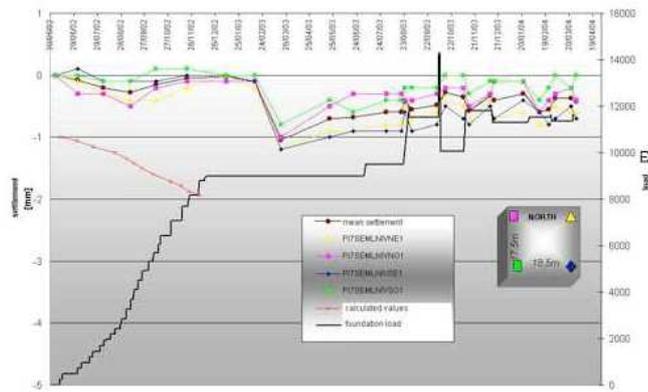


Figure 7: Tassement de la semelle P7. Le tassement observé correspond aux valeurs calculées (mesures Eiffage, document Eiffage)

Les opérations de lançage ont eu lieu sous surveillance météorologique avec une vitesse limite du vent de 85 km/h en rafales (Fig. 8).

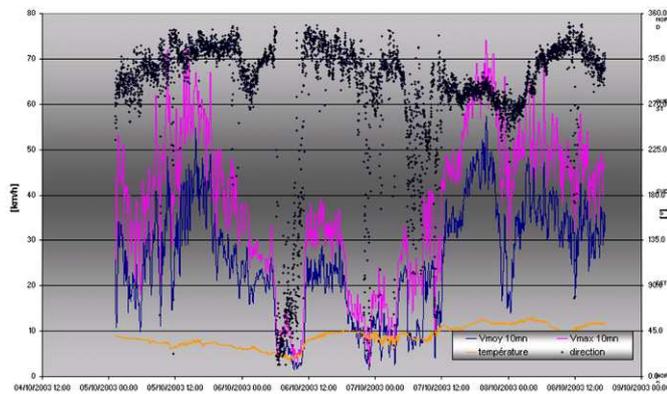


Figure 8 : Effet du vent pendant le lançage L 5 sud

Lors d'un lançage de nombreux paramètres sont enregistrés et comparés aux valeurs calculées : la position de l'avant-bec du tablier, mesurée avec une station totale et un récepteur DGPS, est montrée sur la figure 9. Sur la figure 10, on voit l'évolution de la charge appliquée au sommet d'une pile pendant le lançage du tablier. Ce contrôle utilisait les mesures des charges appliquées aux vérins de lançage installés au sommet des piles et des palées provisoires. La figure 11 montre la surveillance vis-à-vis du "patch-loading" du caisson du tablier (instabilité concomitante dans l'âme et dans la tôle de fond de caisson) et la figure 12 illustre la surveillance des haubans.

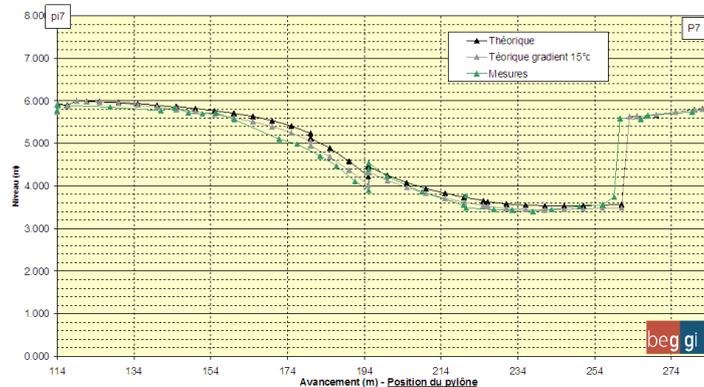


Figure 9 : Niveaux calculés et observés du tablier pendant le lançage (mesures : Eiffage, document : BEG)

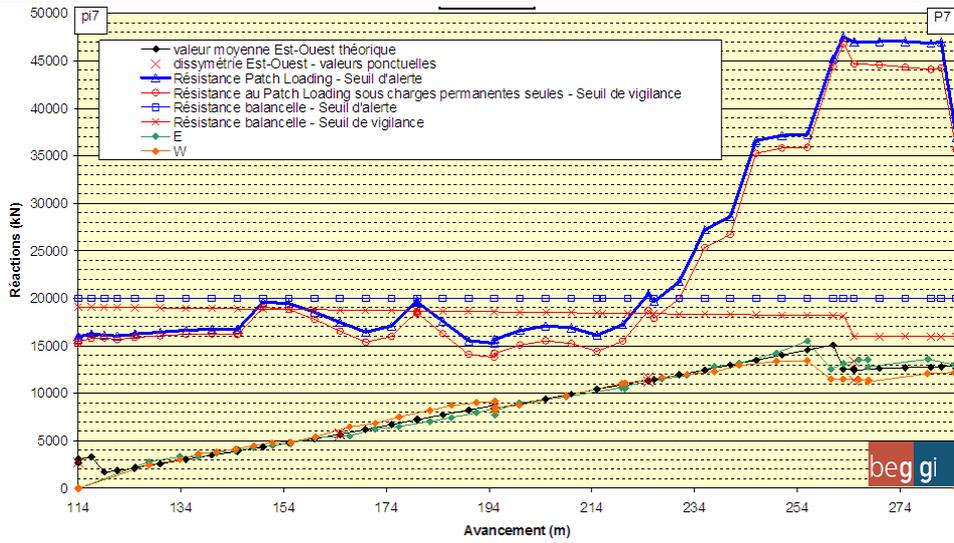


Figure 10 : Réaction d'appui calculée et observée sur la pile P7 (mesures : Eiffage, document : BEG)



Figure 11 : Capteurs de "patch loading"

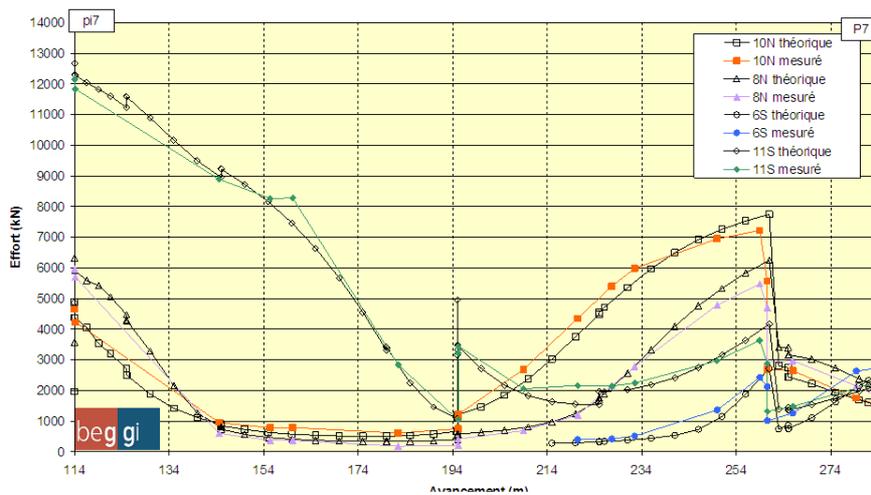


Figure 12 : Lançage LAS – efforts dans les haubans

7. LE SUIVI DE L'OUVRAGE EN PHASE DE RECEPTION ET EN PHASE D'EXPLOITATION

A la fin des travaux plusieurs types de mesure ont été réalisés :

- des mesures réalisées juste avant sa mise en service, afin de vérifier la corrélation entre son comportement réel et celui annoncé par le calcul
- des mesures en continu à partir de sa mise en service, pour s'assurer de son bon fonctionnement dans le temps.

Les mesures réalisées avant la mise en service du viaduc de Millau furent les suivantes :

- Des mesures dynamiques :
 - sous excitation ambiante, pour déterminer les principaux modes et fréquences propres de la structure
 - sous excitation impulsionnelle, pour mesurer l'amortissement des premiers modes propres de vibration.
- Des mesures statiques :
 - mesures de flèches du tablier lors du passage des convois (ou kamags) qui transportaient les pylônes jusqu'à leur emplacement définitif
 - mesures de flèches sous un chargement réglementaire induit par une trentaine de camions.

Compte tenu qu'un vent relativement important produirait des déplacements sensibles dans l'ouvrage, les essais ne pouvaient se dérouler qu'avec des conditions météo favorables, soit une vitesse de vent moyen au niveau du tablier inférieure à 5 m/s environ, c'est-à-dire de l'ordre de 20 km/h.

7.1 Essais dynamiques (par lâcher)

L'essai de lâcher dynamique avait pour but :

- d'évaluer la valeur de l'amortissement structurel pour les premiers modes du viaduc, qui apportent une contribution à la réponse au vent de la structure ;
- de vérifier ainsi les valeurs adoptées pour le dimensionnement, soit 0,3 % pour tous les modes et quel que soit l'élément de structure concerné (acier ou béton).

Pour l'essai de lâcher dynamique il s'agit :

- d'appliquer une charge de 100 tonnes sur le tablier ;
- de libérer subitement cet effort ;
- d'enregistrer les accélérations de la structure en différents points pour en déduire :
 - la forme des principaux modes propres de vibrations,
 - l'évolution des déplacements (accélérations) de chacun de ces modes après le lâcher et donc l'amortissement.

La charge a été appliquée sur le tablier au moyen d'un câble constitué de 8 torons T15 (Fig. 13)

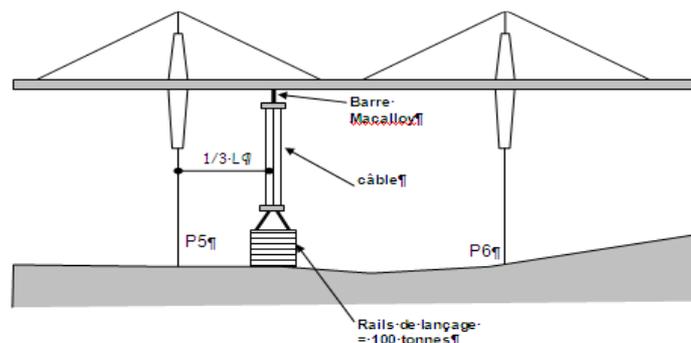


Figure 13 : Schéma du dispositif de l'essai de lâcher de câble

L'instrumentation mise en place était constituée des capteurs du monitoring de l'ouvrage implantés par SITES et de capteurs temporaires additionnels posés par le CSTB sur la partie sud de l'ouvrage (Fig. 14).

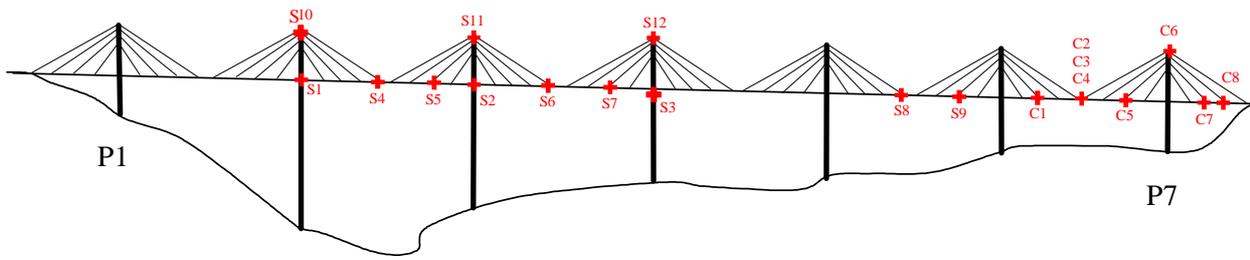


Figure 14 : Position des capteurs sur l'ouvrage

Pour chaque mesure, la durée d'acquisition était de 960 secondes et la fréquence de numérisation de 100 Hertz.

Suivant le type de modes, verticaux ou horizontaux, l'excitation ambiante et/ou le lâcher ont été utilisés pour les identifier :

- modes propres horizontaux : excitation ambiante
- modes propres verticaux : excitation ambiante et lâcher.

7.1.1 Modes verticaux

Les enregistreurs étaient disposés sur l'ouvrage de manière optimale pour la mesure des vibrations verticales. L'analyse spectrale des signaux bruts a montré que quatorze modes verticaux pouvaient être clairement identifiés entre 0,2 Hz et 0,9 Hz (Tableau 2).

Les fréquences propres de ces modes verticaux sont très proches des valeurs prévues par le calcul : on remarque que la valeur mesurée f_m est supérieure de 2 % à 4 % à la valeur calculée f_c , ce qui est un écart très faible compte tenu des hypothèses adoptées pour le calcul. Les déformées mesurées sont elles aussi très proches de celles calculées

Modes propres verticaux ^a	Fréquence calculée ^b F_c [Hz] ^a	Fréquence mesurée ^b F_m [Hz] ^a
4 ^a	0,250 ^a	0,256 ^a
6 ^a	0,280 ^a	0,293 ^a
8 ^a	0,321 ^a	0,336 ^a
10 ^a	0,370 ^a	0,385 ^a
12 ^a	0,423 ^a	0,433 ^a
15 ^a	0,474 ^a	0,494 ^a
17 ^a	0,532 ^a	0,549 ^a
21 ^a	0,589 ^a	0,604 ^a
26 ^a	0,639 ^a	0,653 ^a
28 ^a	0,685 ^a	0,702 ^a
29 ^a	0,725 ^a	0,748 ^a
32 ^a	0,766 ^a	0,762 ^a
34 ^a	0,797 ^a	0,815 ^a
36 ^a	0,818 ^a	0,833 ^a

Tableau 2 : Fréquences calculées et mesurées des modes verticaux

7.1.2 Modes horizontaux

Seules les mesures sous excitation ambiante ont permis l'identification de ces modes puisque l'excitation réalisée pour les deux lâchers était verticale et que les capteurs positionnés pour la circonstance mesuraient principalement les accélérations verticales du tablier.

La comparaison des modes transversaux identifiés à partir des mesures avec ceux prévus par le calcul, (Fig. 15, modes 1, 3, 5, 18, 20) montre une bonne adéquation des déformées, parfaite sur les deux premiers modes, puis moins conforme au fur et à mesure de l'accroissement de l'ordre des modes.

En ce qui concerne les fréquences propres, les écarts entre les valeurs mesurées et celles calculées sont plus importants que pour les modes verticaux : pour les sept premiers modes, l'ouvrage réel est plus raide que celui modélisé dans le calcul (écart de 5 à 10 % de la valeur de la fréquence propre), ensuite c'est l'inverse, les valeurs des fréquences mesurées deviennent progressivement inférieures à celles calculées.

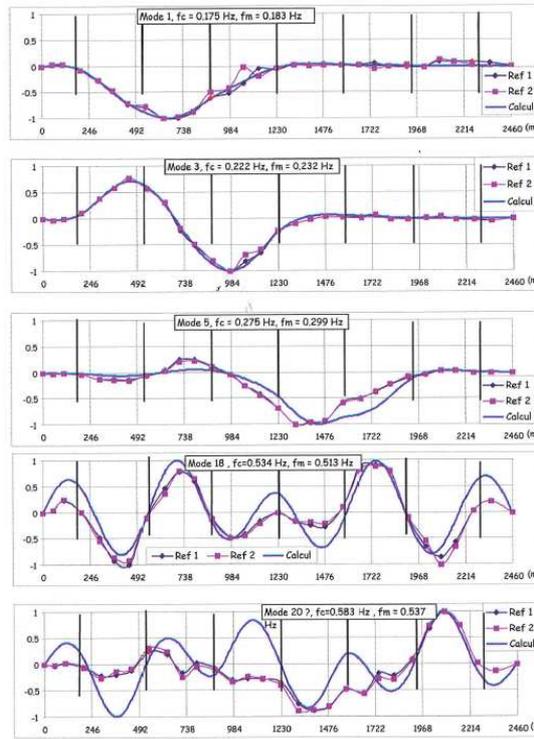


Figure 15 : Déformées modales des modes transversaux n° 1, 3, 5, 18 et 20 du tablier
 Comparaison des mesures (réf. 1 et réf. 2) et des calculs

7.1.3 Modes de torsion

Les traitements réalisés avec les capteurs FEUP ont permis de faire ressortir les fréquences de 0,916 et 0,928 Hz, discernables aussi sur les capteurs C2, C4. On retrouve donc bien la « famille » des modes de torsion prévue par le calcul à ces fréquences, sans pour autant pouvoir identifier de manière individuelle chacun des modes de torsion.

7.1.4 Mesure de l'amortissement structurel

La mesure de l'amortissement moyen, calculé sur l'ensemble du signal exploitable et associé à chaque mode, est synthétisée dans le tableau 3. Celui-ci est assez variable, de 0,35 % à 0,79 % du critique. Il est dans la gamme des valeurs retenues lors des calculs de l'ouvrage (Tableau 3).

Mode	Fréquence	Amortissement moyen (% du critique)
4	0,260	0,36
6	0,299	0,43
8	0,336	0,79
10	0,386	0,51
12	0,433	0,75
15	0,493	0,68
17	0,546	0,53
21	0,603	0,38
26	0,654	0,44
28	0,707	0,35
29	0,747	0,48
34	0,812	0,51
36	0,832	0,30

Tableau 3 : Fréquence et amortissement moyen mesurés pour les 14 premiers modes verticaux du tablier du viaduc

7.2 Essais statiques

7.2.1 Mesures sous le passage des convois de transport des pylônes

Le passage des kamags servant à transporter les pylônes jusqu'à leur emplacement définitif sur pile, avant leur mise en place par relevage, ne faisait pas partie des épreuves réglementaires de l'ouvrage car le tablier ne se trouvait pas alors dans sa configuration définitive (portées de 171 m non encore haubanées à ce stade de la construction).

Cependant pendant cette opération de transport des pylônes, l'ouvrage a été soumis au chargement le plus important puisque le poids d'un kamag circulant sur le tablier avec son chargement correspondant au poids d'un pylône avoisinait les 900 tonnes. Cet essai de chargement du tablier clavé, mais non haubané et reposant toujours sur ses palées provisoires de lancement, était ainsi beaucoup plus sévère que le plus sévère des essais statiques réglementaires.

Il a donc été prévu des arrêts pendant le transport des pylônes sur kamags, afin de prendre les mesures dans la position qui donne la flèche la plus importante et ce pour les cas suivants :

- transport du pylône P1 : à mi-travée $\pi 1$ P1 ;
- transport du pylône P4 : à chaque demi-travée traversée avant d'arriver en position finale ;
- transport des pylônes P5, P6 et P7 : à chaque demi-travée pour les trois dernières demi-travées avant d'arriver à leurs positions finales.

7.2.2 Essais de chargement réglementaires

Trente-deux camions chargés (poids de 38 et 26 tonnes) et vingt-et-un cas de chargement étaient prévus pour les épreuves sous chargement statique.

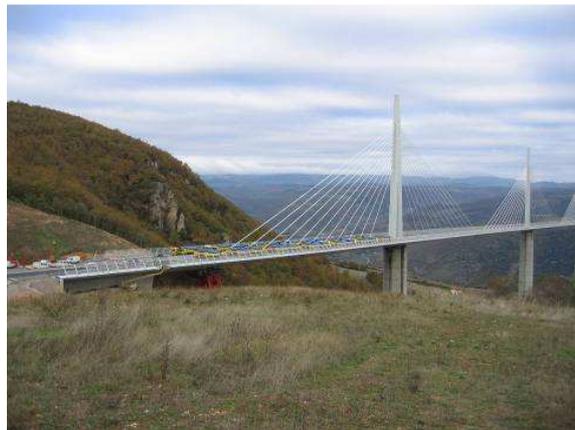


Figure 16 : Chargement de la travée de rive, côté sud

L'écart maximum constaté de poids de véhicule entre les chargements réels et les hypothèses de l'étude des épreuves a été très faible (environ 1%).

Les cas de chargement réalisés avaient pour objet de s'assurer du comportement global de l'ouvrage, en appliquant à la structure des charges de caractère normal sans y créer des sollicitations supérieures à celles qui apparaîtront pendant son exploitation.

Ces essais ont été complétés par des essais de flexion transversale de la dalle orthotrope.

7.2.3 Mesures de déplacement du tablier

Les effets significatifs étaient bien sûr les déplacements verticaux avec un déplacement maximum mesuré de l'ordre de 600 mm.



Figure 17 : Déformée de l'ouvrage pendant les essais

Les résultats sont tout à fait satisfaisants. Les écarts les plus importants sont inférieurs à 30 mm, donc inférieurs à deux fois la précision de la mesure, c'est-à-dire sans signification réelle.

Tous les écarts traduisent des déplacements mesurés inférieurs aux valeurs calculées. Cette tendance révèle un comportement légèrement plus raide que prévu. Une explication probable se situe au niveau des piles : l'étude des épreuves de chargement adopte, pour l'évaluation du module du béton, une qualité B60 alors que la qualité du béton était proche du B80.

7.2.4 Mesures de déplacement des pylônes

Sur base de la même démarche que pour le tablier, les mesures des déplacements horizontaux longitudinaux ont été comparées aux valeurs théoriques.

7.2.5 Mesures d'effort dans les haubans

Les objectifs du contrat de concession en matière d'instrumentation des haubans étaient les suivants :

- contrôle de la tension des haubans tout au long de la vie de l'ouvrage ;
- analyse des variations de tension dans les haubans sous les effets du vent et du trafic routier ;
- étude des vibrations des haubans ;
- contrôle de la corrosion, c'est-à-dire de la durabilité des haubans.

L'instrumentation mise en place par la société Advitam, filiale de Freyssinet, concerne six haubans du fléau P3 sud (haubans n° 2, 4, 6, 8, 10 et 11).

Au niveau de chaque point de mesure, quatre informations sont collectées :

- la température (sonde de température) ;
- la tension dans le hauban (cellule de force) ;
- les accélérations dans le plan perpendiculaire au hauban (accéléromètre 2 voies).

Chaque capteur est relié à la centrale d'acquisition, située au sud de la pile P3 dans le caisson est. Les différentes fonctions de cette centrale sont les suivantes :

- acquisition des données ;
- stockage des données ;
- définition des paramètres d'acquisition.

Les enregistrements des données se font sur la base de seuils prédéfinis (vent : 15m/s moyen et accélérations : 1,5m/s²).

La précision minimum de la mesure fournie par les cellules de charge est de 1 % ; cela implique que la précision absolue des mesures soit de :

- 45 kN pour le hauban 2S (hauban court) ;
- 68 kN pour le hauban 11S (hauban long).

Les écarts mesurés sur les haubans 2S, 4S, 6S et 8S se sont avérés inférieurs à la précision de mesure ; ils n'avaient donc pas de signification concrète.

Des écarts un peu plus importants ont été observés pour les haubans longs, de l'ordre de 70 kN, pour le hauban 10S et 120 kN pour le hauban 11S. Cette différence pourrait provenir d'un effet « chaînette » non considéré pour déterminer les valeurs théoriques. Pour le hauban 11S par exemple, le module apparent du hauban, sous charge permanente, vaut 86 % du module nominal.

7.2.6 Mesures de déplacement sur les piles

Les écarts entre les déplacements théoriques et les résultats des mesures ont été également inférieurs à la précision des mesures.

7.2.7 Comportement local du tablier. Flexion transversale

L'objectif de cet essai était de contrôler la répartition transversale des charges (comportement local du tablier). Les charges d'épreuves étaient constituées de deux camions de 26 tonnes placés côte à côte. La flexion de cinq augets et de la tôle supérieure était mesurée par des capteurs. Les déformations attendues n'étant toutefois pas significatives, il a été implanté des jauges de contraintes afin d'évaluer les contraintes en semelle supérieure et en semelle inférieure des augets (Fig. 18).

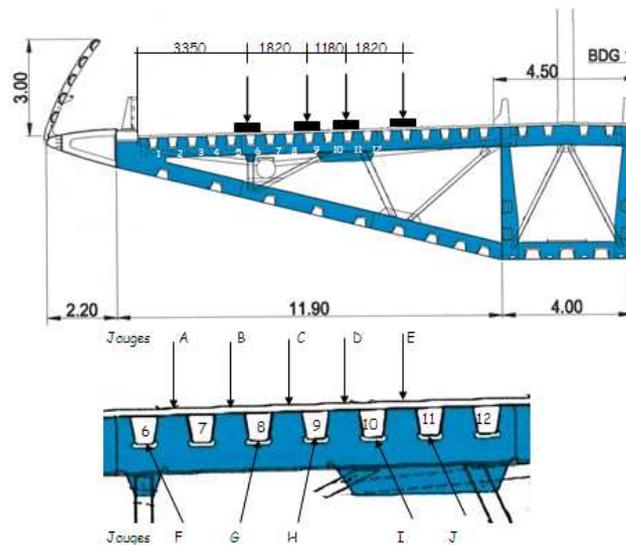


Figure 18 : Localisation des jauges

Certains paramètres étaient différents entre les hypothèses initiales du calcul et l'essai effectivement réalisé ; les calculs ont été repris en considérant les différences les plus significatives afin de s'assurer de la conformité entre valeurs mesurées et calculées.

7.3 Conclusions sur le suivi en phase de réception

7.3.1 Sur les épreuves statiques de chargement d'ensemble

Les informations essentielles qui traduisent le fonctionnement de l'ouvrage sont les déplacements verticaux du tablier et les déplacements longitudinaux des pylônes.

Les mesures obtenues concordent bien avec le calcul, compte tenu de la précision des mesures, à l'échelle de la structure.

L'ouvrage répond aux chargements conformément au modèle de calcul tant sur le plan flexionnel longitudinalement que sur le plan torsionnel du tablier.

7.3.2 Sur le comportement en flexion locale de la dalle orthotrope

On relève quelques différences sensibles par rapport à la théorie ; le comportement global de la dalle orthotrope est toutefois conforme aux prévisions.

7.3.3 Sur le comportement dynamique de l'ouvrage

Les essais dynamiques combinés aux mesures ambiantes ont permis d'inventorier un grand nombre de modes de vibration du viaduc, nettement plus qu'espéré au départ. Les modes obtenus sont en général parfaitement conformes en termes de fréquences et de déformées aux modes calculés lors des études d'exécution de l'ouvrage. Sur les quarante premiers modes, vingt-cinq modes ont été identifiés expérimentalement dont seize des dix-huit premiers.

Le taux d'amortissement structurel des modes verticaux est globalement conforme à ce qui était attendu ; il a été possible de caractériser la dépendance de cet amortissement à l'amplitude des vibrations.

8. LE SUIVI DE L'OUVRAGE PENDANT SON EXPLOITATION

En ce qui concerne le suivi de l'ouvrage en service, trois objectifs fondamentalement différents sont visés :

- Le premier, et le plus important, est de contrôler en permanence les conditions d'exploitation de l'ouvrage pour assurer la sécurité du trafic et des usagers. L'ouvrage est ainsi équipé de capteurs et dispositifs particuliers permettant d'assurer les fonctionnalités suivantes :
 - la surveillance du trafic,
 - la mesure de la vitesse du vent,
 - la détection de verglas.
 - Un suivi continu des paramètres suivants :
 - ouverture des joints de chaussée sur culées,
 - température de l'air et du caisson (moyenne),
 - humidité relative du tablier métallique,
 - température en surface de la chaussée,
 - vitesse du vent.

L'ensemble de ces mesures est effectué en temps réel au PC d'exploitation de la gare de péage à Saint-Germain. Le suivi des différentes valeurs mesurées est affiché sur écran sous forme numérique et graphique. L'afficheur permet de savoir si l'on est dans le cas de franchissement de seuil ou non. Les alertes surviennent lorsqu'un seuil prédéfini est franchi (Fig. 19).



Figure 19 : PC d'exploitation

- Le second est de contrôler le vieillissement de l'ouvrage. L'ouvrage est équipé d'une instrumentation permettant le suivi :
 - des fondations : des mesures de nivellement contrôlées par des mesures inclinométriques permettent d'évaluer le tassement éventuel des fondations dans le temps (Tableau 4).

	déc.2006·Origine*□	Nov.·2007□	Déc.·2008□	Janv.·2010□	Oct.·2010□
C0□	s=-0·mm□	+0,4·□	+1,0□	+1,4□	+2,2□
P1□	s=-0·mm□	-1,3··*□	+0,1□	+0,5□	-0,4□
P2□	s=-0·mm□	-0,2□	-0,4□	+0,7□	+0,6□
P3□	s=-0·mm□	-1,5·□	-1,2□	-1,0□	-0,8□
P4□	s=-0·mm□	+0,7□	+0,5□	+1,2□	+1,4□
P5□	s=-0·mm□	+0,2□	-0,2□	+1,0□	+1,2□
P6□	s=-0·mm□	-0,9··**□	-2,0□	-0,8□	-0,4□
P7□	s=-0·mm□	-1,2··**□	-1,4□	+1,2□	+1,7□
C8□	s=-0·mm□	-0,1□	-0,3□	+0,0□	+0,1□

*·Origine·en·2007·avec·les·4·repères[¶]
**·Origine·en·2008·avec·les·4·repères□

Tableau 4 : Tassements moyens des piles et des culées depuis 2006 (comptés positivement vers le bas ou négativement vers le haut)

- Des piles : il est réalisé des mesures géométriques tout à fait classiques à l'aide de prismes et inclinomètres ; des mesures des déformations dans le béton des piles sont réalisées à l'aide d'extensomètres afin d'évaluer le fluage du béton et des mesures de la température pour évaluer les gradients thermiques transversaux et leurs effets (Fig. 20).

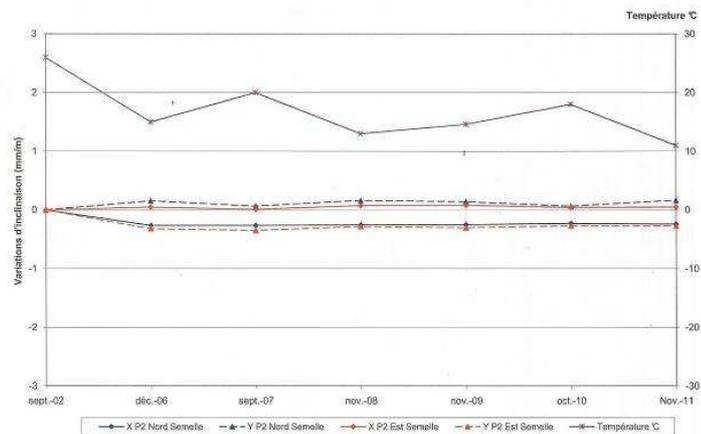


Figure 20 : Variations de l'inclinaison de P2 selon les axes transversal et longitudinal

- Du tablier : il est réalisé des mesures géométriques (en travée et sur appuis) ; des mesures de température (27 capteurs dans le tablier dont 3 dans l'air) ; des mesures de l'humidité de l'air à l'intérieur du caisson et des mesures accélérométriques sur déclenchement du seuil de vent.
- Des pylônes : il est réalisé des mesures géométriques à l'aide de prismes et d'inclinomètres, des mesures accélérométriques en tête des pylônes P2 à P4 sur déclenchement du seuil de vent.
- Des haubans : il est réalisé le suivi :
 - de l'amortissement des haubans instrumentés (six haubans côté sud du pylône P3),
 - de la tension dans les torons équipés de cellules de mesure,
 - des éventuelles vibrations des haubans,
 - du souffle (ou déplacement) des joints de chaussée sur culée (Fig. 21).

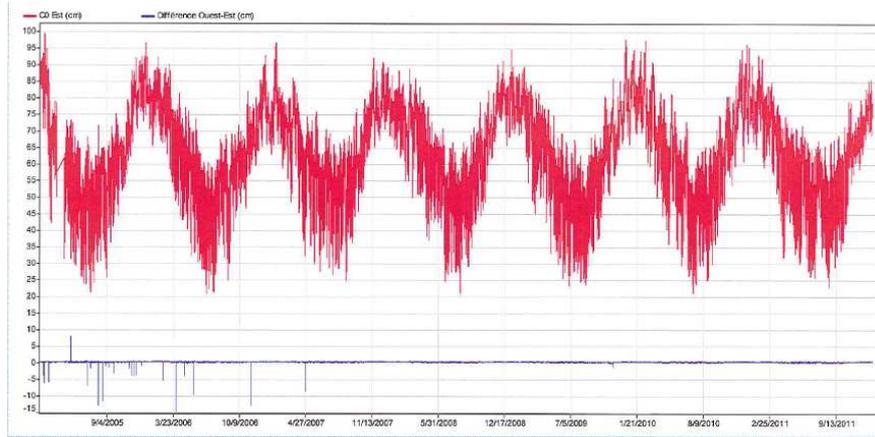


Figure 21 : Evolution du souffle du joint de chaussée sur C0

- Le troisième et dernier objectif est de contrôler que le comportement de l'ouvrage en service est conforme aux prévisions des calculs d'exécution. Comme pour le pont de Normandie, il a été étudié deux séquences de vent fort lors des tempêtes Klaus (le 24 janvier 2009) et Xynthia (le 28 février 2010). Ces deux études ont confirmé que les résultats des calculs théoriques effectués lors des études d'exécution étaient sécuritaires par rapport aux résultats des calculs effectués sur la base des enregistrements mesurés par les différents capteurs.

9. CONCLUSION

Afin de valider les calculs et de pouvoir juger du comportement de l'ouvrage pendant sa construction (et notamment pendant les opérations de lancement), puis durant la phase d'exploitation, il a été mis en œuvre un programme d'instrumentation, dont l'importance dépasse de beaucoup ce qui se fait habituellement pour les ouvrages haubanés et exceptionnels. Ce programme a permis de suivre le comportement de tous les éléments de l'ouvrage pendant sa construction (puits marocains, semelles, piles, palées provisoires, tablier, pylônes, haubans).

Les opérations liées à la réception de l'ouvrage ont permis d'établir des valeurs de base qui servent de références pour le suivi du viaduc pendant son exploitation.

La conception du programme de suivi et d'instrumentation est une étape de première importance dans le suivi de l'ouvrage. Alors que c'est souvent l'inverse, le choix des matériels, de leur nombre, de leur précision, a été précédé d'une importante phase de conception avec la définition des objectifs, des moyens pour atteindre ces objectifs, de leur mise en œuvre dans le temps et aussi de leurs coûts.

Les résultats de l'instrumentation en phase de construction puis en phase d'exploitation ont montré que cette stratégie, avec l'organisation et la gestion des données qui en découlent, est essentielle pour la réussite de l'opération.



Figure 22: Le viaduc de Millau après le lancement L6