

DIX ANNÉES DE MONITORING STRUCTUREL DU VIADUC DE MILLAU

Sylvestre GALLICE*, Hervé LANÇON**, Claude SERVANT***

* CEVM

** SITES

*** Eiffage travaux publics

1. PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Le viaduc de Millau est un ouvrage financé et réalisé par le groupe EIFFAGE dont la filiale, la Compagnie Eiffage du Viaduc de Millau (CEVM), est concessionnaire de l'ouvrage pour 75 ans (Photo 1).

Ce viaduc multi-haubané exceptionnel a une longueur de 2 460 m et une hauteur de 343 m au sommet des pylônes (Fig. 1).

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).

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. 2)

Le tablier dont la largeur totale est de 27.75 m 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 4 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 comportant un platelage supé-



Photo 1 : Le viaduc (© Eiffage)

rieur orthotrope constitué de tôles de 12 à 14 mm d'épaisseur (sous la voie lente).

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 onze paires de haubans disposés en semi-éventail ancrés de part et d'autre des pylônes dans l'axe du tablier.

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

Le tablier 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 – Photo 2).

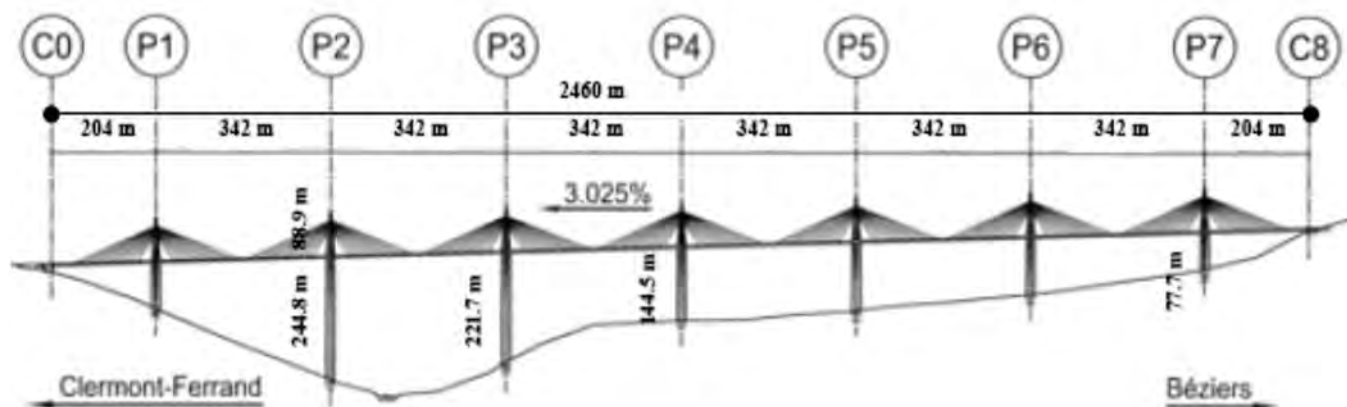


Fig. 1 : Vue longitudinale du viaduc

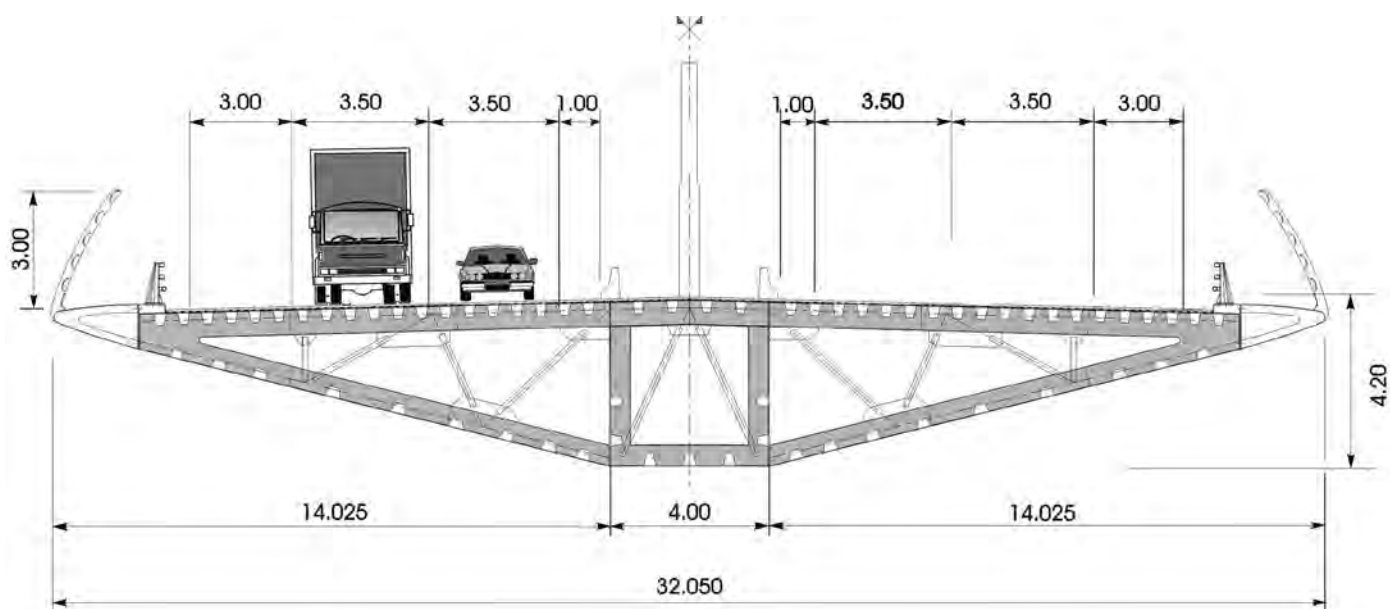


Fig. 2 : Coupe transversale du viaduc



Photo 2 : Lançage du tablier (© Eiffage)

2. LES OBJECTIFS ET LA CONCEPTION DU SUIVI DE L'OUVRAGE

Les objectifs de suivi de l'ouvrage étaient 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.

Le suivi a été divisé en trois phases : construction, réception et surveillance à long terme dont les objectifs diffèrent d'une phase à l'autre.

L'installation des dispositions d'instrumentation en cours de travaux a été menée dans un contexte d'optimisation de son utilisation pour les phases de réception et de suivi à long terme.

Pendant la construction, des contrôles sont nécessaires pour vérifier la géométrie et les déplacements de l'ouvrage, principalement lors des opérations de lancement du tablier. Les techniques topographiques qui ont été utilisées, ont permis de vérifier que le comportement du viaduc était conforme aux prévisions des calculs.

Au moment de la réception de l'ouvrage, c'est l'état de référence de l'ouvrage qui est enregistré et notamment sa réponse vis-à-vis des sollicitations statiques et dynamiques lors des essais de chargement. Cet état sert de "point zéro" pour la surveillance à long terme.

En phase d'exploitation la surveillance à long terme 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.

Le suivi du viaduc (Tableau 1) a été volontairement séparé des systèmes de contrôle conçus pour la sécurité du trafic. La mesure de la vitesse du vent qui peut déclencher la fermeture du viaduc utilise un canal indépendant des informations de surveillance.

La plupart des instruments de suivi – capteurs, modules d'acquisition de données, réseau – sont des dispositifs issus du monde industriel pour la plupart en technologie électronique. Seul le suivi du comportement en déformation au jeune âge du béton des fondations a été réalisé avec des capteurs à technologie fibre optique.

La gestion de milliers de données exige un soin particulier. Les données doivent être 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.

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 suivi en continu de trois années avec enregistrement de nombreux paramètres en dynamique de façon à appréhender des périodes de très fortes sollicitations de vent ainsi que la

réponse de l'ouvrage. 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.

3. LE SUIVI DE L'OUVRAGE EN PHASE D'EXPLOITATION

L'instrumentation du viaduc de Millau est divisée en deux ensembles distincts : le système statique et le système dynamique. Chaque ensemble possède sa propre chaîne d'acquisition et son application dédiée (Fig. 3).

3.1. Système statique

Une acquisition est effectuée toute les 30 secondes et la valeur de chaque capteur est enregistrée toutes les 30 minutes.

3.2. Système dynamique

L'enregistrement dynamique (suivant une cadence de 40 Hz) est effectué sur dépassement de seuil de la vitesse instantanée du vent (seuil réglable – actuellement à 90 km/h) ; la durée de cet enregistrement est à chaque fois de 10 minutes et inclut les 4 composantes fournies par l'anémomètre 3D situé au sommet du pylône PY2.

Depuis la fin des travaux, plusieurs types de mesure ont ainsi été réalisés :

- des mesures juste avant la mise en service afin de vérifier que le comportement réel est conforme à celui prévu par le calcul
- des mesures en continu à partir de la mise en service pour s'assurer de son bon fonctionnement et vieillissement dans le temps.

Les mesures réalisées avant la mise en service par le CSTB Nantes furent :

- des mesures dynamiques :
 - sous excitation ambiante, pour déterminer les principaux modes et fréquence propres de la structure (Tableau 2 et Fig. 4)
 - sous excitation impulsionnelle pour mesurer l'amortissement des premiers modes propres de vibration (Tableau 3)
- des mesures statiques
- mesure des flèches du tablier sous un chargement réglementaire induit par une trentaine de camions de 30 tonnes environ.

En ce qui concerne les mesures réalisées après la mise en service, trois objectifs fondamentalement différents sont visés :

- 1) 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,

Mesure de...	Au moyen de	Nombre	Dans le but de...
<i>Phase de construction</i>			
Déformation du béton des fondations au jeune âge (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
Rotation fondation et piles	Inclinomètres amovibles sur embases	2 embases par pile = 14	Redondance sur item précédent
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 des piles d'extrémité	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

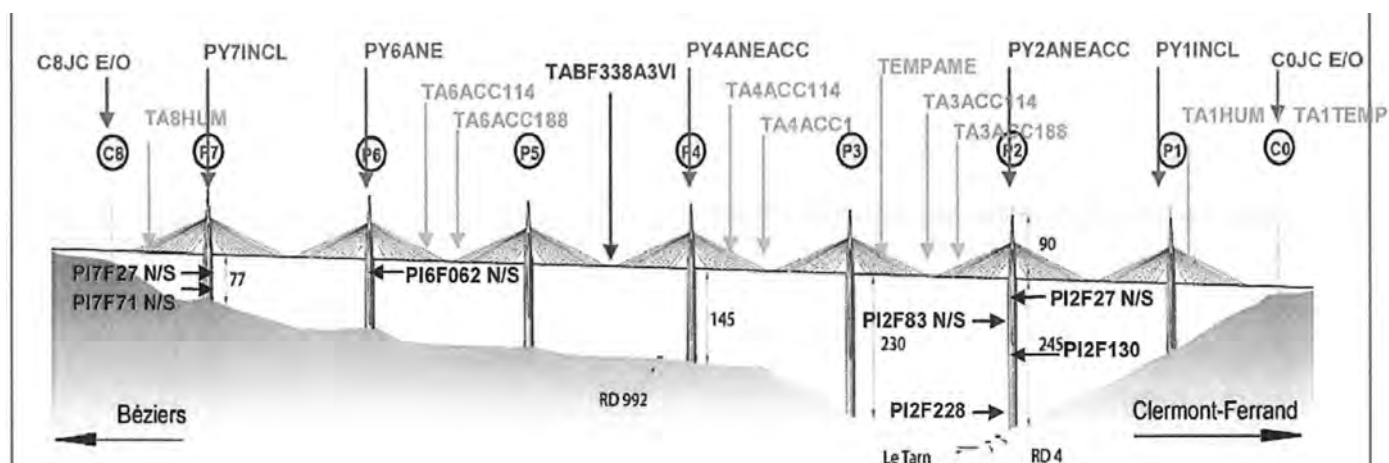


Fig. 3 : Schéma d'implantation des coffrets d'acquisition de l'instrumentation du viaduc

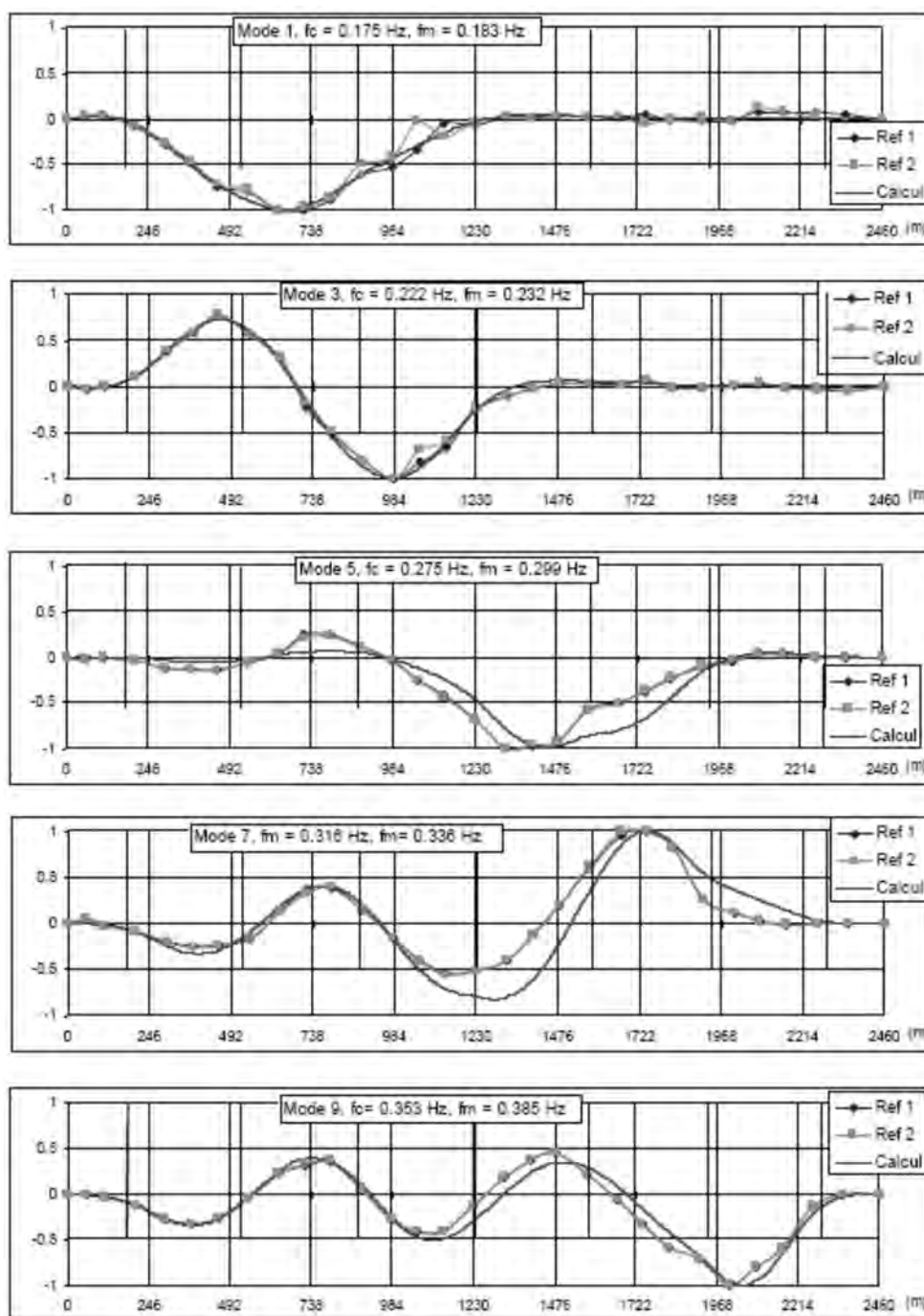


Fig. 4 : Déformées modales des cinq premiers modes transversaux du tablier

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

Tableau 2 : Comparaison des fréquences mesurées et calculées pour les 14 premiers modes verticaux du tablier

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



Photo 3 : PC d'exploitation (© Eiffage)

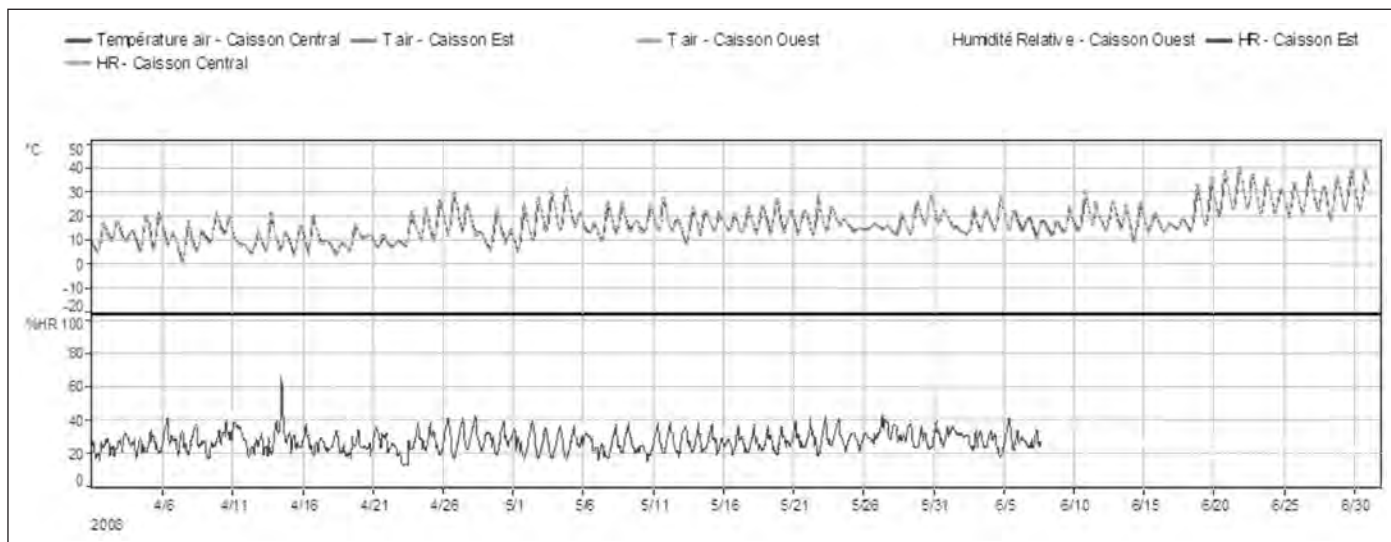


Fig. 5 : Température et humidité relative du tablier

- la détection des phénomènes glissants
- le suivi continu des paramètres suivants :
 - ouverture des joints de chaussée sur culées,
 - température (moyenne) de l'air et du caisson,
 - humidité relative du tablier métallique (Fig. 5),
 - température en surface de la chaussée,

L'ensemble de ces mesures est visualisé en temps réel au PC d'exploitation de la gare de péage situé à Saint-Germain à 6 km au nord du viaduc (photo 3). Ce 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

	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 : Tassement moyen des piles et des culées depuis 2006

seuil ou non. Les alertes surviennent lorsqu'un seuil pré-défini est franchi.

2) Le second est de contrôler le vieillissement de l'ouvrage. L'ouvrage est équipé d'une instrumentation permettant le suivi :

- Des fondations : il est réalisé des mesures altimétriques par nivellement direct et une redondance par des mesures inclinométriques permettant d'évaluer le tassement absolu et différentiel éventuel des fondations dans le temps (Tableau 4).
- Des piles : il est réalisé des mesures géométriques discrètes sur prismes conjuguées à des mesures sans prisme sur les génératrices des piles de grande hauteur. En effet, en regard des mouvements importants journaliers du tablier les piles sont en permanence en mouvement et il s'avère important de surveiller l'allure de leur déformée à partir d'une mesure réalisée dans un temps le plus court

possible. En outre, les piles d'extrémité P1 et P7 comportent des capteurs inclinométriques avec des mesures en continu à l'aide du système de surveillance (Fig. 6).

Des mesures des déformations dans le béton des piles sont réalisées à l'aide d'extensomètres afin de connaître l'évolution du fluage du béton. Il est aussi effectué des mesures de la température pour évaluer les gradients thermiques transversaux et leurs effets.

- Du tablier : il est réalisé des mesures géométriques (en travée et sur appui) ; des mesures de température (dans le tablier et 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 six haubans instrumentés côté sud du pylône P3 (Photo 4 et Fig. 7)
 - 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. 8 et 9)

Chaque joint de chaussée est équipé d'une paire de capteurs de déplacement pour surveiller la déformation et le déplacement du tablier par rapport au culées (Photo 5)

Chaque trimestre SITES fournit un rapport de synthèse des mesures acquises, qui permet la constitution de la base données météorologiques sur l'ouvrage. Ce rapport présente

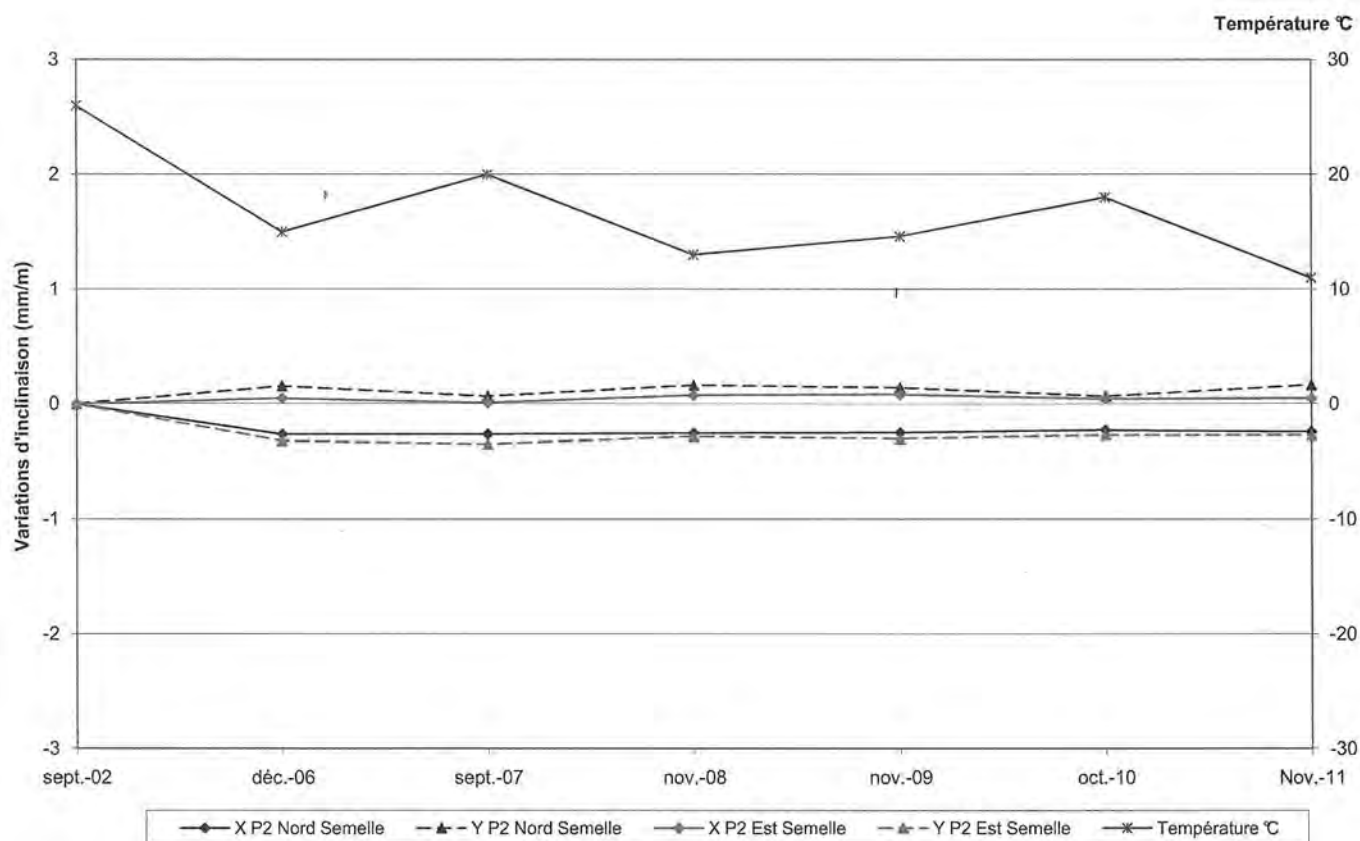


Fig. 6 : Variations de l'inclinaison de P2 selon les axes transversal et longitudinal



Photo 4 : Dispositif de mesure de l'amortissement des haubans (© CSTB)

hauban S08									valeurs retenues	
date	heure	mode	freq 1 (Hz)	X1 (%)	freq 2 (Hz)	X2 (%)	freq 3 (Hz)	X3 (%)	freq (Hz)	X (%)
04-avr	17:46	1	0.8563	0.43	0.8534	0.43	0.8546	0.32	0.85	0.39
04-avr	18:04	2	1.6969	0.26	1.6843	0.28	1.6932	0.36	1.69	0.30
04-avr	18:15	3	2.5544	0.16	2.5521	0.13	2.5399	0.15	2.55	0.15
04-avr	18:26	4	3.3905	0.21	3.3864	0.22	3.386	0.24	3.39	0.22
04-avr	18:32	5	4.2269	0.33	4.2238	0.36	4.2293	0.24	4.23	0.31
04-avr	18:42	6	5.0705	0.27	5.0645	0.14	5.07	0.25	5.07	0.22
04-avr	18:51	7	5.8977	0.37	5.9009	0.39	5.898	0.45	5.90	0.40
04-avr	18:57	8	6.7378	0.64	6.7176	0.55	6.7185	0.56	6.72	0.58
04-avr	19:02	9	7.5623	1.09	7.6192	1.18	7.5901	1.1	7.59	1.12
04-avr	19:10	10	8.3907	0.58	8.3586	0.63	8.3918	0.53	8.38	0.58

Fig. 7 : Résultat des mesures d'amortissement pour le hauban S08

Déplacement / température 2011 - Trimestre 2

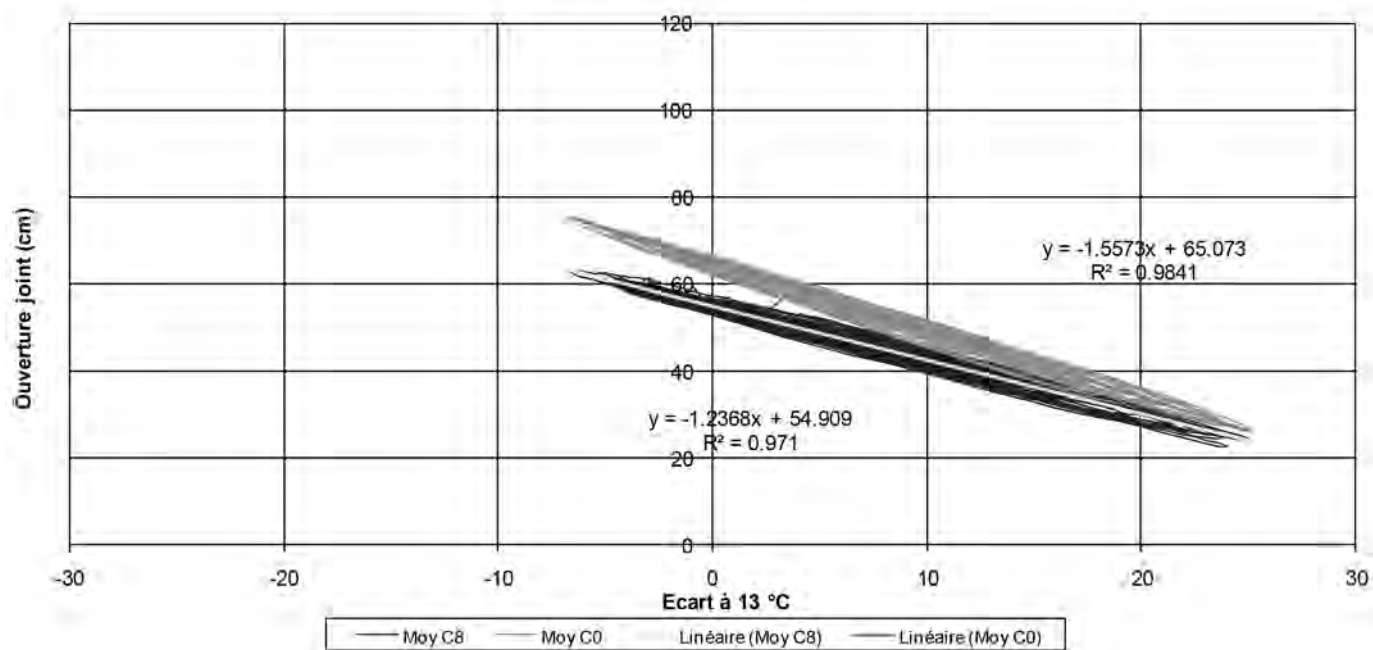


Fig. 8 : Joints de chaussée : déplacement / température sur 1 trimestre

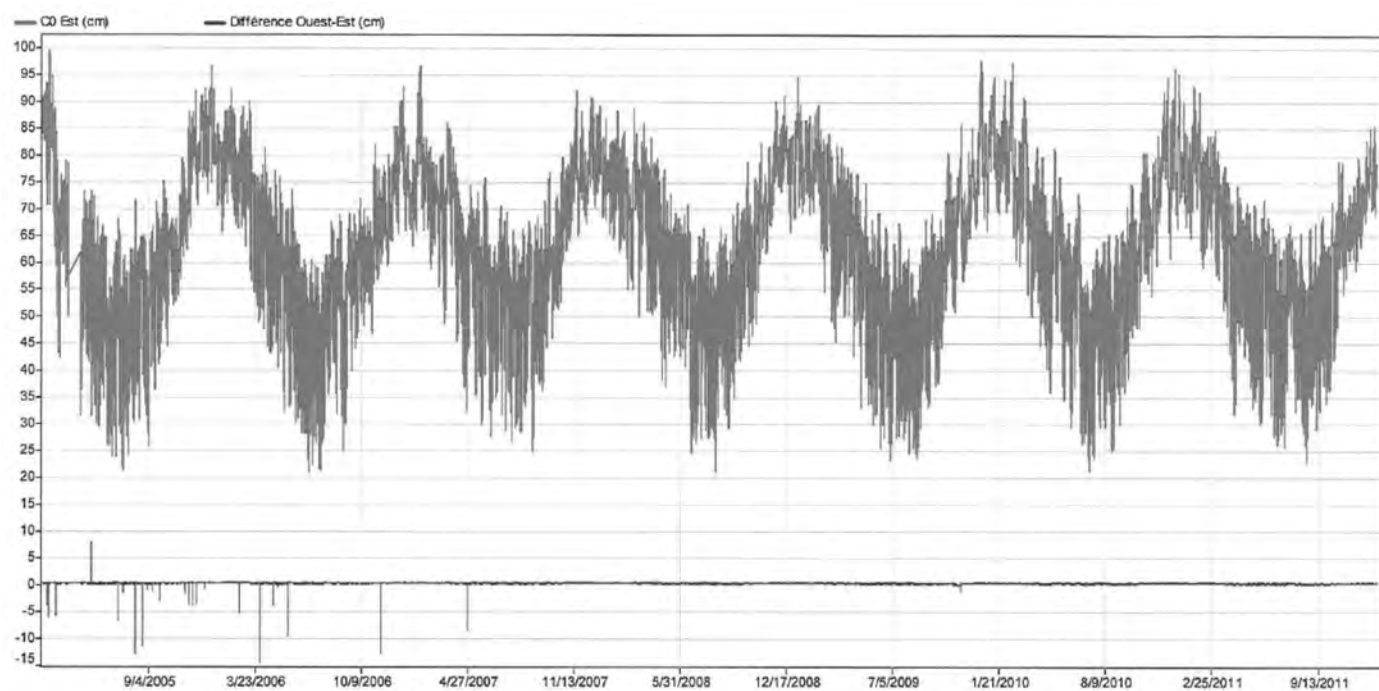


Fig. 9 : Evolution du souffle du joint de chaussée sur culée C0

les mesures métrologiquement fiables associées à des traitements statistiques permettant de disposer de critères d'évaluation, issus de corrélation et de comparaison temporelle simple. Cette synthèse permet au Maître d'Ouvrage et à ses experts de s'assurer de l'état de santé de l'ouvrage.

3) 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 par le CSTB de Nantes des séquences de vent fort lors des tempêtes Klaus (le 24 janvier 2009) et Xynthia (le 28 février 2010).

Ces études ont confirmé que les résultats des calculs théoriques effectués par le bureau Greisch lors des études d'exécution étaient sécuritaires par rapport aux résultats des calculs effectués sur la base des enregistrements mesurés par les différents capteurs (Fig. 10 à 15).

De plus, afin de s'assurer que les hypothèses de calcul concernant les effets de la température établies à partir des analyses menées sur le pont de Normandie bien adaptées, le tablier a été équipé de 27 sondes de température dans une section située en travée P2-P3 afin de permettre des enregistrements en continu depuis la mise en service fin décembre 2004 (acquisition toutes les 30 minutes environ) (Fig. 16).

Les enregistrements des mesures font actuellement l'objet d'une étude de la part du STOA d'Eiffage TP avec les conseils de Michel Virlogeux qui avait déjà piloté celle du pont de Normandie.

Nous donnons ci-après sous forme de courbes les résultats des premiers traitements réalisés à fin 2012 (Fig. 17 à 23). Une estimation du gradient thermique transversal dans les piles est également prévue afin de la comparer aux 6°C pris en compte dans les calculs et qui sont vraisemblablement largement surestimés.

En outre, il est prévu de réaliser tous les 10 ans à partir de sa mise en service, soit en 2014, 2024, etc. des mesures sur des prélèvements de carottes de béton afin de contrôler



Photo 5 : Joint de chaussée et capteur (© SITES)

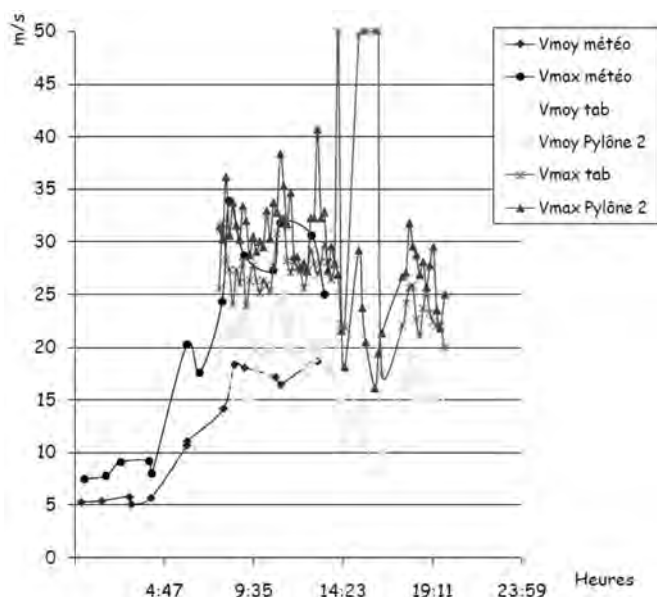


Fig. 10. Tempête Klaus du 24 janvier 2009, enregistrement des vitesses de vent

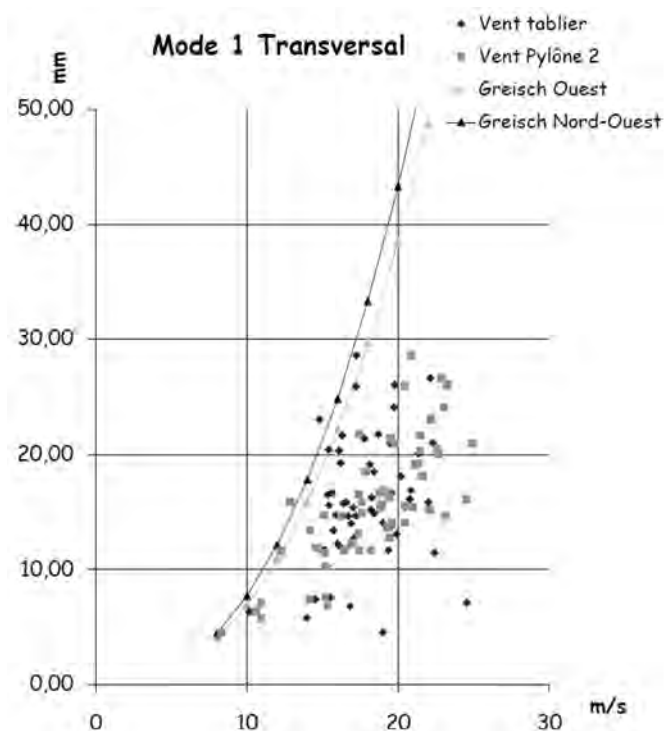


Fig. 11. Résultats pour le mode 1 transversal

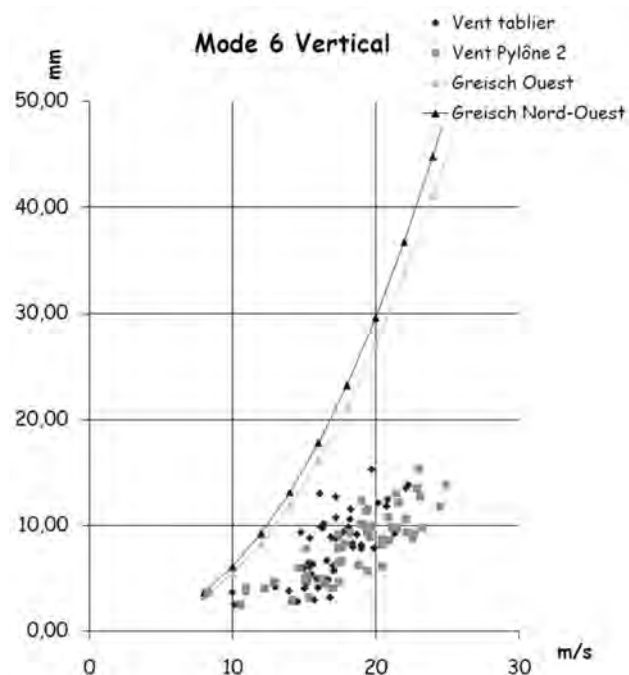


Fig. 12. Résultats pour le mode 6 vertical

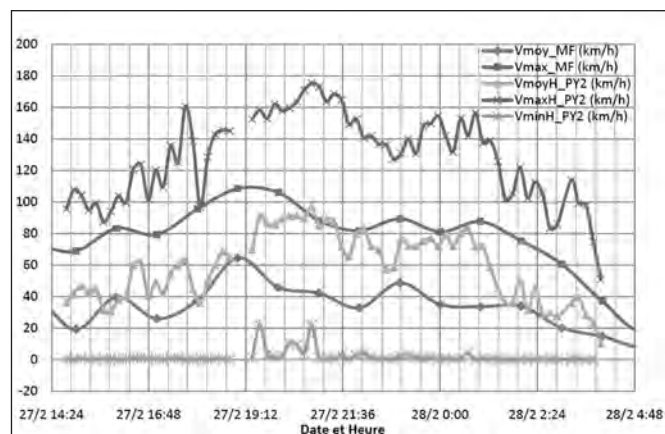


Fig. 13 : Vitesses du vent observées lors de la tempête Xynthia

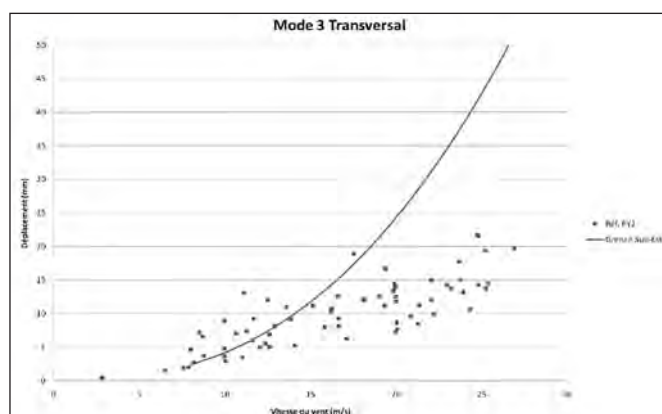


Fig. 14 : Résultats pour le mode 3 transversal

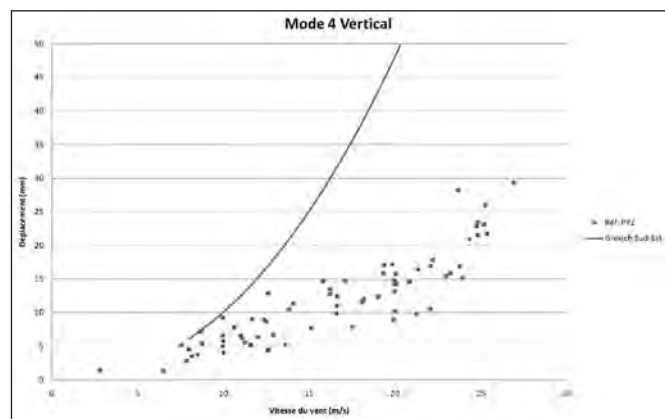
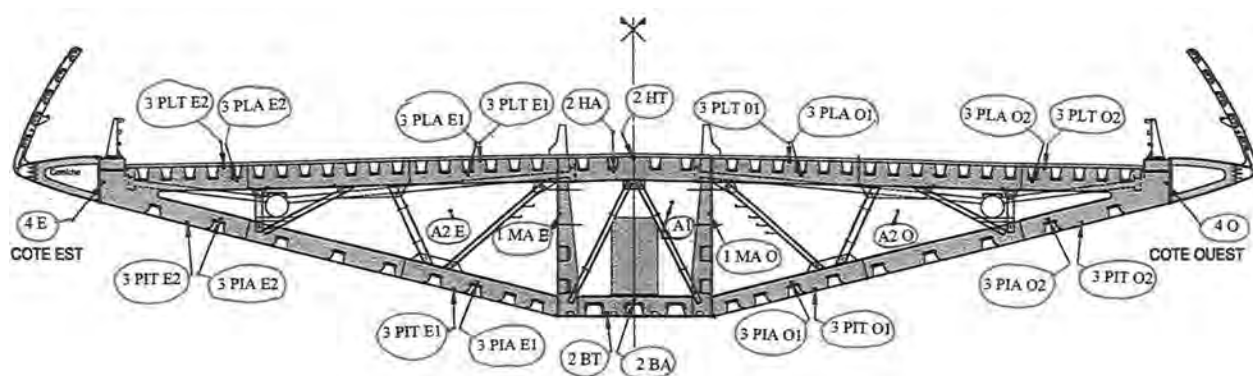


Fig. 15 : Résultats pour le mode 4 vertical



[A1] = une sonde dans le caisson central

[A2] = une sonde dans chacun des 2 caissons latéraux

[1] = une sonde sur chacune des âmes centrales

[2] = une sonde sur la tole (coté int.) et une sur un auget voisin
fond de caisson central
tole de platelage du caisson central

[3] = Deux fois une sonde sur la tole et une sur un auget voisin
chacun des 2 panneaux inclinés
chacune des deux toles de platelage latérales

[4] = une sonde sur l'âme latérale de chaque coté

Fig. 16 : Localisation des capteurs dans le caisson

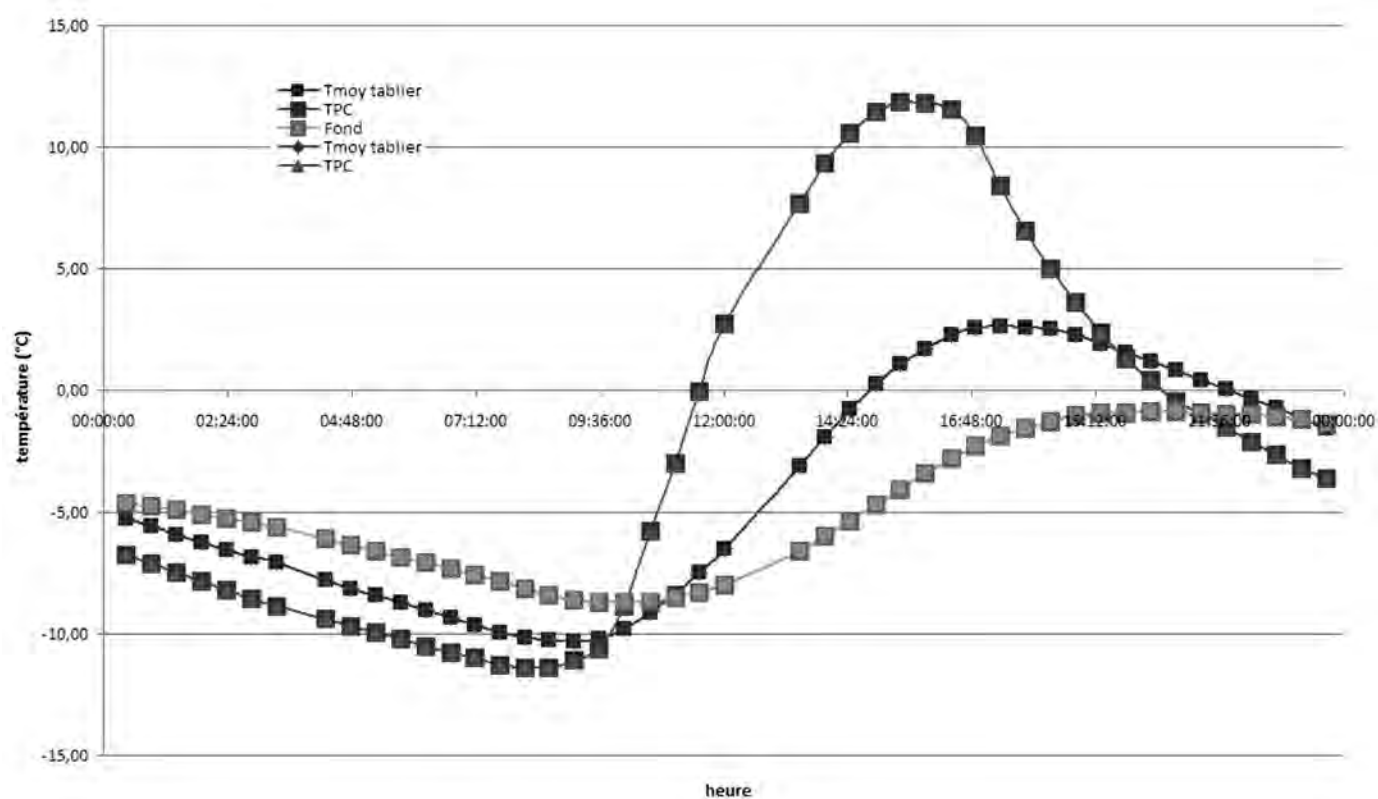


Fig. 17 : Températures du caisson central en journée froide le 01 mars 2005

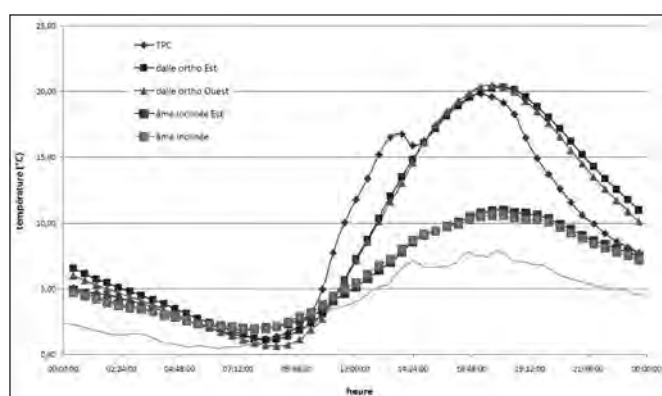


Fig. 18 : Températures des tôles de surface en journée froide le 11 avril 2011

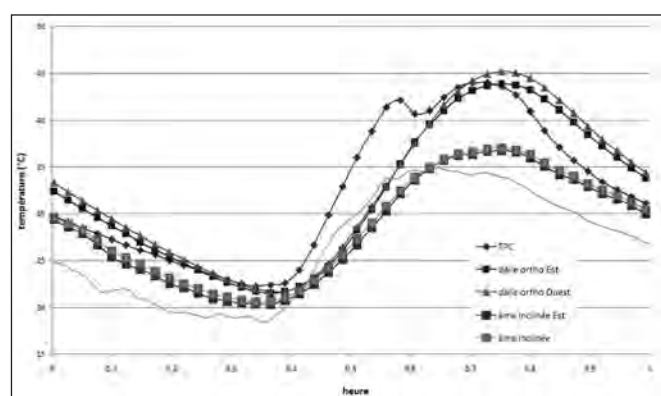


Fig. 19 : Températures des tôles de surface en journée chaude le 20 août 2011

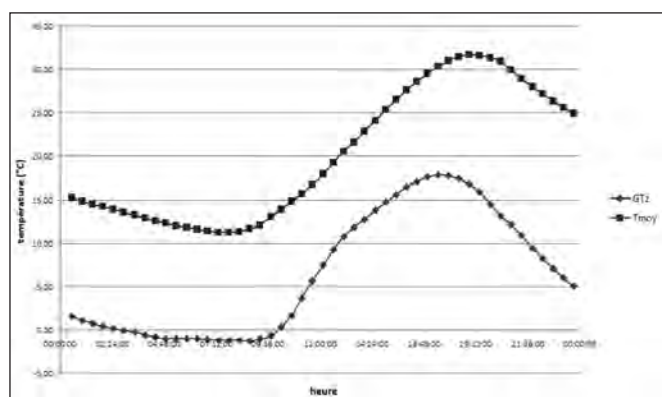


Fig. 20 : Evolution du gradient thermique vertical équivalent en fonction de la température moyenne

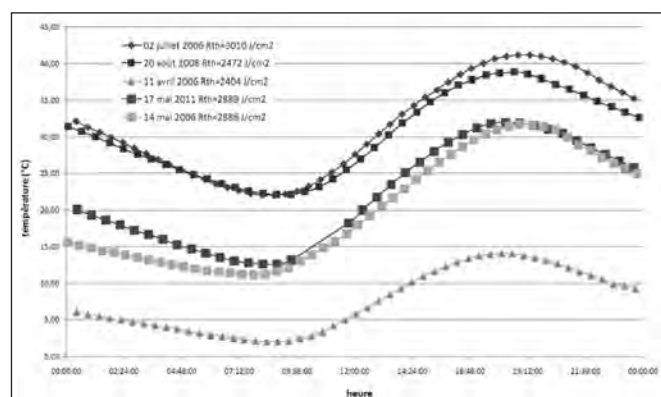


Fig. 21 : Evolution de la température moyenne du caisson sous fort rayonnement thermique

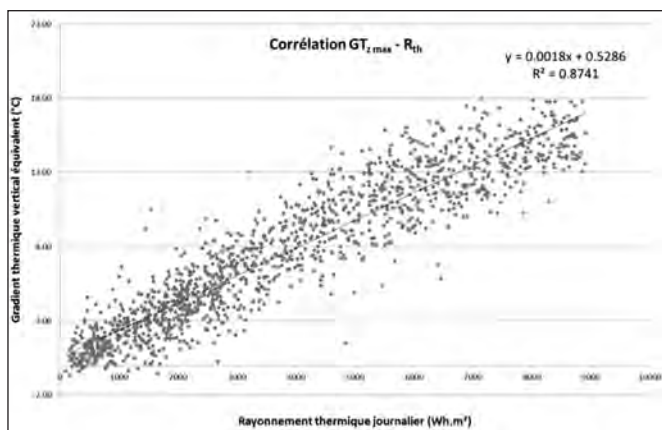


Fig. 22 : Représentation du gradient thermique vertical équivalent en fonction du rayonnement thermique journalier

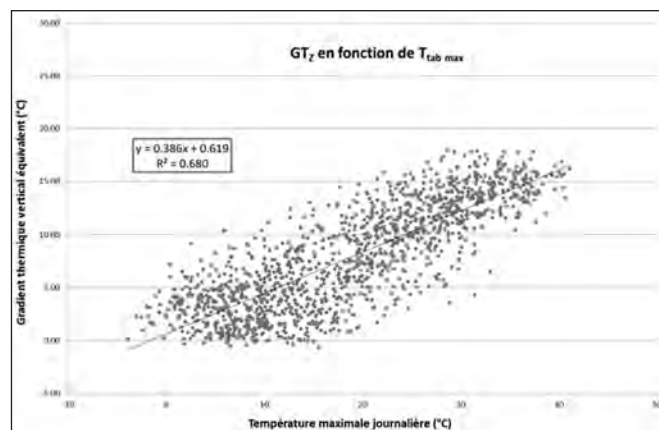


Fig. 23 : Représentation du gradient thermique vertical équivalent en fonction de la température du caisson

simultanément la durabilité et le vieillissement du béton armé des piles (carbonatation et pénétration des chlorures). Les premiers essais réalisés en 2008 sur les échantillons prélevés en pied et au droit des planchers aux niveaux – 90 m et – 168.58 m de la pile P2 ont montré que :

- pour le contrôle de la résistance à la compression, du module d'Young statique et de la résistance à la traction par fendage du béton (B60) : les valeurs mesurées sont largement supérieures aux valeurs prises en compte dans les calculs 75 MPa en moyenne en compression et 7 MPa en traction et un module de déformation longitudinale moyen de 45 GPa.
- la perméabilité à l'oxygène (selon les recommandations de l'AFPC-AFREM) est de l'ordre de $4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ en moyenne.
- La teneur en chlorures est quasiment non détectable quelle que soit la profondeur compte tenu de sa limite de détection égale à 0.005% de la masse du béton.

4. 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. Après avoir suivi le comportement de tous les éléments de l'ouvrage pendant sa construction (fondations, piles, palées provisoires, tablier, pylônes, haubans), les opérations liées à la réception de l'ouvrage ont permis d'établir les valeurs de base qui servent de référence pour le suivi du viaduc pendant son exploitation.

Par ailleurs, le viaduc de Millau a été associé aux deux programmes de recherche suivants :

- le projet ANR « ORTHOPLUS » dont l'objectif était l'optimisation du comportement mécanique des dalles orthotropes et de leur revêtement pour une optimisation globale de leur cycle de vie. Deux campagnes d'essais se sont déroulées sur le viaduc de Millau en octobre 2009 et en octobre 2010 afin de confronter et comparer les résultats des mesures sur site avec ceux des calculs 3D aux éléments finis (Fig. 24)
- le projet LCPC de pesage en marche par pont instrumenté dont l'objectif est de s'assurer de la capacité de systèmes à mesurer avec une précision très satisfaisante et avec une bonne fiabilité les charges sur les ouvrages à dalle orthotrope; et ainsi de fournir aux maîtres d'ouvrages et exploitants des renseignements sur le comportement sous trafic avec une connaissance précise des

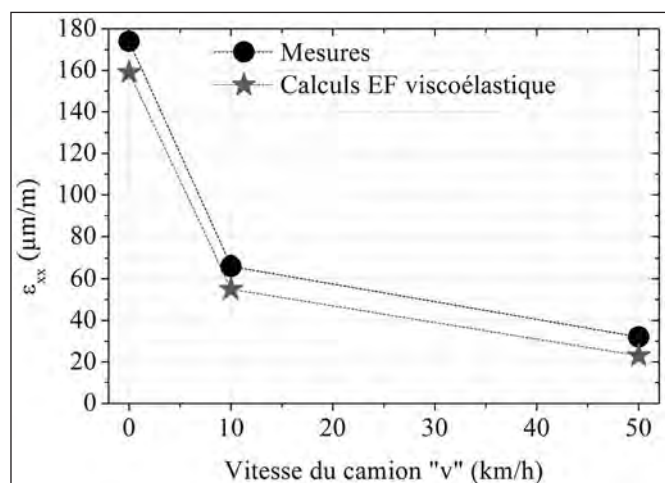
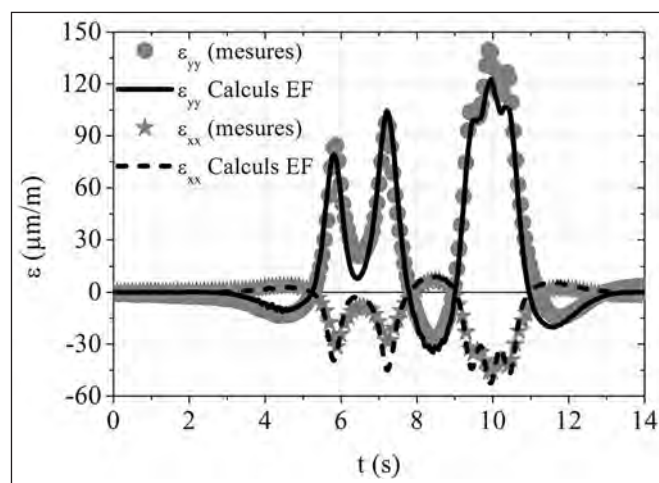


Fig. 24 : Comparaison valeurs mesurées – valeurs calculées (programme ORTHOPLUS)



charges réellement appliquées et de leur historique. Les données recueillies seront ainsi utiles au suivi et à la surveillance de leur ouvrage (Photo 6).

Depuis la mise en service de l'ouvrage le 16 décembre 2004, il a ainsi été vérifié que le comportement de l'ouvrage restait conforme aux prévisions des calculs d'exécution.



Photo 6 : Pesage en marche des camions (© Ifsttar)