

SURVEILLANCE PAR INSTRUMENTATION DES PONTS MÉTALLIQUES FERROVIAIRES UN EXEMPLE DE SYSTÈME OPÉRATIONNEL

Luc DIELEMAN, Didier MARTIN
SNCF Département des Ouvrages d'art

1. INTRODUCTION

Le réseau ferré national comporte de nombreux ouvrages métalliques anciens en mauvais état. Ces ouvrages, généralement construits au XIX^{ème} siècle souffrent de différentes pathologies : réductions de section dues à la corrosion, déconsolidations d'assemblages rivés et fissuration par fatigue.

Pour garantir la sécurité des circulations, la SNCF a été amenée à définir différentes méthodologies de surveillance, faisant toujours plus appel à l'instrumentation. Le pont sur l'Adour à Bayonne en est un bon exemple.

2. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE



La ligne de Bordeaux à Irun (2 voies électrifiées 1.500 V, circulées à 80 km/h, UIC 4) et la rue Gustave Eiffel (6 m de largeur) franchissent la rivière Adour et l'avenue du Capitaine Resplandy (départementale n° 52) à Bayonne au moyen d'un pont rails métallique à cinq travées hyperstatiques de 275 m de longueur (portées : 46,64 + 3 x 59,52 + 46,64 m.) ayant les caractéristiques suivantes :

- voies portées : 2 voies ferrées électrifiées en 1.500 V, circulées à 80 km/h et une chaussée de 6 m de largeur,
- la ligne ferroviaire est un axe stratégique assurant une part importante du trafic marchandise et voyageur entre la France et l'Espagne. Elle est classée dans le groupe UIC 4
- les voies ferrées sont en raccordement parabolique sur les travées d'extrémités.
- les poutres principales ont 5,50 m de hauteur, 14,56 m de distance entre axes. Elles sont en treillis en croix de St-André. Leurs membrures inférieures et supérieures sont en forme de T double,
- les pièces de pont ont 14,56 m de portée, 2,50 m de hauteur HC (hors cornière). Leur âme est en partie, en treillis

- les longerons sous voies et sous la chaussée ont 4,00 m de portée (HC 500 mm). La chaussée est portée par une dalle en béton réalisée sur les longerons
- les appareils d'appui sont fixes sur les piles (colonnes en fonte) et mobiles sur culées.

Mis en service en 1863, cet ouvrage est l'un des derniers ponts métalliques de cet âge encore en service sur le réseau ferré français sur une ligne de cette importance. Il fut aussi l'un des premiers grands ponts métalliques construits.

2.1. Historique :

1862 - 1863 : construction de l'ouvrage,

1935 : violent incendie du platelage bois, remplacement des longerons affectés, mise en place de platelages métalliques entre les pièces de pont 11 à 56,

1942 - 1947 : remplacement de longerons, mise en place de platelages métalliques sur l'ensemble du tablier, remplacement de semelles supérieures de pièces de pont,

1950 : renforcement de 12 pièces de pont sur appuis,

1954 : renforcement des autres pièces de pont sous voies uniquement,

1962 : remplacement des appareils d'appui mobiles, construction d'un hourdis béton pour le passage de la route sur le tablier,

1967 : remplacement de platelages, renforcement de longerons, modification des dispositifs d'attache de voie,

1971 : sur la poutre côté voies ferrées, renforcement des attaches des barres des treillis sur les membrures,

1973 : réfection de la peinture,

2000 : réparation des longerons au-dessus de la pile P4.

3. ÉTAT DE L'OUVRAGE

Cet ouvrage a non seulement subi les actions du temps, mais il concentre tous les facteurs défavorables qui peuvent affecter une structure métallique :

- nombreux défauts de conception, dus à la jeunesse de la technique,
- mauvaise qualité du métal produit au XIX^{ème} siècle : le fer puddlé à une très faible résilience, n'a pas un comportement isotrope et ses courbes efforts allongement ne présentent pas de palier de plasticité.
- corrosion, favorisée par la proximité de l'océan et le transport (passé) de produits chimiques en vrac (soufre),
- faiblesse des appuis constitués de colonnes en fonte fichées dans le sable, et sollicités en permanence par le courant de l'Adour et les marées
- fatigue dans les éléments de structure courts (longerons, attaches de voie).
- difficultés d'entretien liées au site, au trafic ferroviaire et aux nombreuses dispositions de conception (assemblages) rendant difficile, voire impossible, la mise en œuvre d'une protection anticorrosion efficace.



La conjugaison de ces facteurs défavorables a provoqué diverses avaries dans les poutres métalliques. L'action de la corrosion a amplifié l'impact de ces avaries : réductions de sections, entailles provoquées par les coulures des eaux de ruissellement chargées en soufre, déformations de pièces par foisonnement entre points de rivure, déconsolidations d'assemblages rivés (desserrage des rivés, mouvements des pièces assemblées). Ces avaries touchent tous les éléments structuraux de l'ouvrage, y compris les dispositifs d'attache de la voie sur les longerons (en cornières).

Divers mouvements anciens de certaines colonnes en fonte ont introduit des déformations pérennes des poutres principales.

Par ailleurs, on trouve aussi sur cet ouvrage les défauts classiques de déconsolidation des cornières montantes d'attache des longerons sur les pièces de pont.

Mais l'avarie la plus critique sur cet ouvrage se trouve sur les pièces de pont, qui sont un élément structural essentiel de l'ouvrage puisqu'elles assurent la transmission des charges des trains vers les poutres principales et qu'elles maintiennent la stabilité de ces poutres.

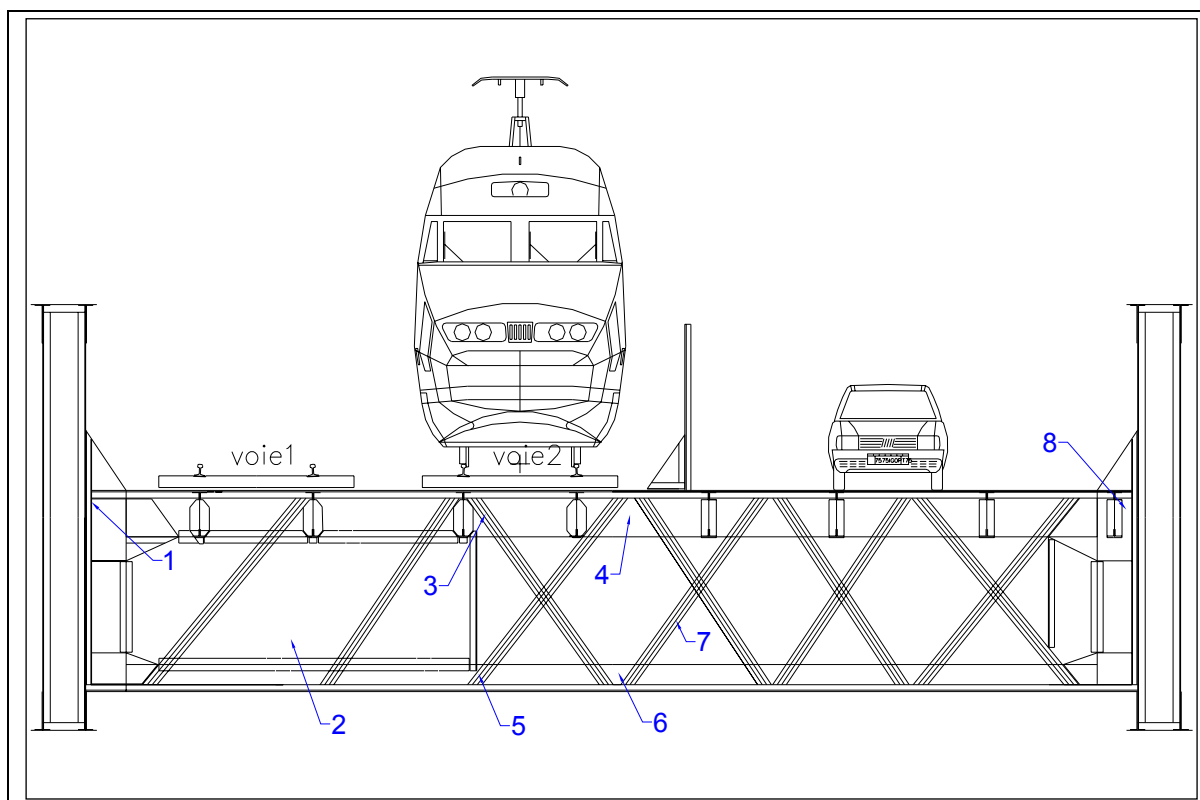
La criticité des « désordres », observés et décrit ci-après au paragraphe 4, résulte de la conception très particulière de ces pièces de pont qui sont des poutres en treillis (croix de Saint André, barres constituées de profilés laminés en forme de rail : les rails « Brunel »), de portée importante du fait qu'elles supportent 2 voies ferrées et une double voie routière. La hauteur importante et la recherche de la légèreté imposaient, à l'époque de la conception, le treillis.

Après analyse de risque portant sur l'ensemble de la structure, identification des éléments ou pièces pouvant être redondants, évaluation de scénarios de rupture plausibles, c'est bien la rupture fragile de la membrure inférieure des pièces de pont, en travée, qui est apparue la plus probable et la plus susceptible de provoquer un déraillement des trains.

4. CONSTATATIONS SUR LES PIÈCES DE PONT



Pièce de pont courante à treillis



Les avaries sont relevées principalement sur les points numérotés de 1 à 8 sur le schéma ci-dessus :

1. fissures sur les attaches des pièces de pont sur la poutre principale, côté voie ferrée
2. fissures sur les renforts additionnels d'âme des pièces de pont :
3. desserrage de l'attache haute des rails Brunel,
4. desserrage de l'attache haute des deux barres de treillis sur la membrure supérieure des pièces de pont,
5. desserrage de l'attache de la barre de treillis sur la membrure inférieure des pièces de pont,
6. desserrage de l'attache de la barre de treillis sur la membrure inférieure des pièces de pont et corrosion sous les rails,
7. fissuration des soudures des plats de renfort sur les profilés des treillis,
8. fracturation des goussets d'attache du contreventement supérieur.

4.2.Évolution des avaries

La fonction analyse de l'outil de gestion des avaries sur les ponts de la SNCF (logiciel « RADIS ») permet de visualiser l'évolution des avaries :

Année	Déconsolidation de rivets (nb)	Fissures (m)	Déconsolidations d'assemblages (m)	Perforations (m²)	Corrosion foisonnante (m)	Déformations localisées (m²)	Avaries métal (nb)
2005	1	209,65	6,97	1,69	5,48	0	28
2006	28	245,23	158,78	2,04	22,46	4,84	155
2007	41	248,04	206,18	2,11	25,02	5,74	195
01/08	70	260,38	235,05	2,16	27,19	7,44	233

La définition des avaries de ce tableau et leur mode de mesurage se réfère au système de cotation des avaries de la SNCF.

Les avaries des colonnes 1, 2, 3 et 7 sont plutôt liées au trafic. Les nombres qui les mesurent sont en progression permanente.

Nota : En 2005, la visite ne couvrait pas l'ensemble du tablier (accès limité à certaines parties)

5. MESURES DE SECURITÉ

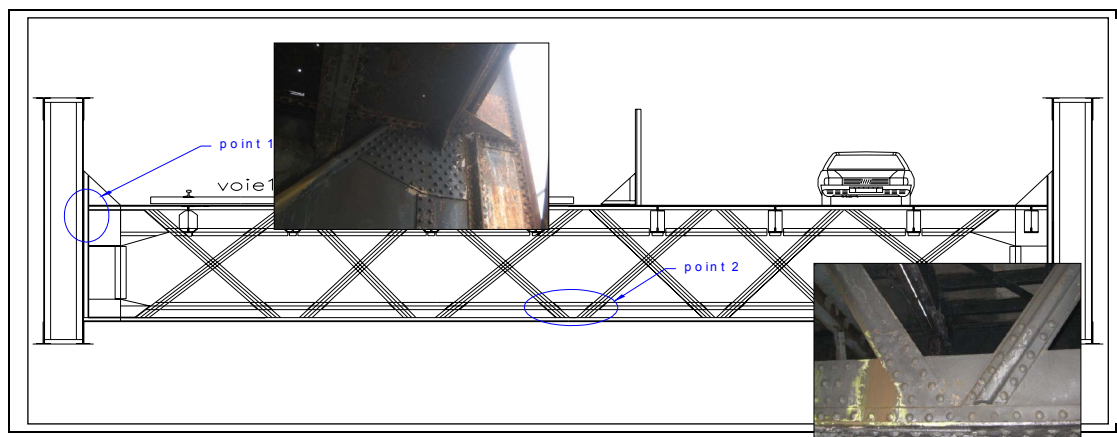
L'état de l'ouvrage et l'évolution observés des avaries a justifié la mise en œuvre, dès 2006, des mesures suivantes:

- ralentissement des trains à 40 km/h,
- remise en état de la voie et de ses attaches sur les longerons pour réduire les chocs dus aux défauts de nivellement,
- inspection visuelle renforcée de cycle semestriel
- et mise en œuvre d'une surveillance continue par instrumentation.

Par ailleurs, le remplacement de l'ouvrage, déjà inscrit dans le programme de régénération des ponts métalliques anciens, a été fixé pour 2012.

6. PRÉSENTATION DE LA SURVEILLANCE CONTINUE PAR INSTRUMENTATION

Elle consiste à disposer sur la structure des capteurs aptes à mesurer de manière fiable certains paramètres physiques caractérisant le fonctionnement de l'ouvrage (microdéformations, forces, déplacements, accélérations...) ou de l'un de ses éléments structuraux et à concevoir un système de mesures apte à détecter des variations anormales et à émettre des messages d'alerte au personnel chargé de la surveillance des trains.



Points critiques sur les pièces de pont

6.1. Le plan d'instrumentation

Les points critiques – susceptibles de connaître des variations d'effort ou de déformation anormales - sont situés au droit de l'attache sur la poutre principale (point 1), côté gauche du tablier, et au milieu de la membrure inférieure (point 2). C'est donc dans ces 2 zones qu'il faut disposer des capteurs. L'évènement à détecter étant une rupture fragile d'une pièce ou d'un assemblage en traction, les capteurs devaient pouvoir mesurer des allongements sur une base de longueur suffisante pour contenir les sections affaiblies (réduites par corrosion ou par fissuration) susceptibles de se rompre. L'inconvénient du choix d'une base longue est, bien sûr, le faible impact sur le capteur d'une réduction de section ponctuelle, due à une fissure par exemple.

Ce sont les capteurs à fibre optique qui présentent aujourd'hui les propriétés qui répondaient le mieux au cahier des charges :

- précision,
- fidélité
- mesure continue
- fiabilité (durée de vie du système : 10 ans)
- insensibilité aux champs électriques.

La technologie par capteur optique a été retenue.

Au final, le procédé optique retenu est le procédé OSMOS, qui exploite la technologie de l'optique guidée dont le paramètre de modulation est l'intensité lumineuse passant dans une fibre optique. La déformation de la fibre entraîne des pertes de lumière. La détection et la quantification de ces pertes permettent la mesure de l'atténuation

de l'intensité lumineuse. L'effet capteur est obtenu par la corrélation entre l'atténuation et la déformation longitudinale de la fibre. La réponse du capteur est instantanée et permet des mesures dynamiques. Il n'y a pas de traitement complexe et cette technologie est éprouvée.

Les CFO utilisés sont décrits aux figures ci-après.

La mesure de la température de la structure en divers points est également nécessaire pour pouvoir séparer les effets du trafic d'autres actions, comme la température.

Les mesures sont réalisées en base longue, donnant ainsi une mesure de déformation répartie.

La transmission du signal des capteurs à la station de monitoring par un câble optique standard permet de franchir des longues distances sans transformation ni amplification intermédiaire

La station de monitoring de base est constituée de l'unité « maître » qui remplit toutes les fonctions de réseau requises (appel et gestion des données) et de l'« esclave » qui saisit les valeurs de mesures. La liaison entre maître et esclave s'effectue par un BUS RS 485.

L'ensemble du système peut être configuré en ligne par un serveur Web ou en mode offline à l'aide d'un éditeur. Un serveur de base de données établi avec tous les points de mesures configurés, une liaison par modem et archive toutes les données brutes et de configuration apparues depuis la dernière liaison.

Un tableau de bord permet de visualiser toutes les informations souhaitées sur la structure.

Les données peuvent être également exportées (jpeg, bmp, tableau ASCII) pour être traitée ultérieurement.

Pour les mesures statiques, les données sont saisies à une fréquence de balayage de 100 Hz. A partir de ces valeurs, une mémoire de valeurs moyennes calculées sur un intervalle de temps prédéfini est créée et sauvegardée chaque jour dans un fichier statique.

Un seuil dynamique ($\Delta I/\Delta t$) est défini pour les mesures dynamiques. Si la mesure dépasse ce seuil, le contenu actuel de la mémoire et les valeurs mesurées jusqu'au dépassement ainsi que les 300 mesures suivantes sont enregistrées dans un fichier.

Lorsqu'une valeur de mesure dépasse un seuil un message est généré par fax, SMS, e-mail.

Les pièces de pont instrumentées sont réparties entre les travées 2 à 5 (les pièces de pont de la travée 1 ont été toutes renforcées sur toute leur largeur).

Les paramètres à mesurer sont les déformations horizontales (en traction) des sections au droit des fissures présumées et des réductions de section.

CORDES OPTIQUES

- capteur non électrique
- mesure en base longue (2.00 m)
précision 0.002 mm
- enregistre de façon continue toutes les déformations statique et dynamiques (temps de réponse quasi nul)
- fixé à mi-portée des membrures inférieures des pièces de pont via une plaque de fixation vissée au centre des rivets.
- protégées par une goulotte fermée aux extrémités





Pièce de pont n° 13 de la travée 2, fibre optique avec sa protection

EXTENSOMETRES OPTIQUES

- plage de mesure 5 mm précision: 0.002 mm
- fréquence de mesure jusqu'à 100 hz installés au niveau des attaches de la membrure supérieure de la pièce de pont en palpeur sur la poutre principale
- fixation identique à celle des cordes optiques



Ci-dessus: Extensomètre optique sur plaque de fixation

SONDES DE TEMPERATURE

- 8 sondes pour rendre compte de l'influence des variations thermiques
- plage -50 à +150 °C
- coef. 3.850 ppm/K
- tolérance: $\pm 0.12\%$

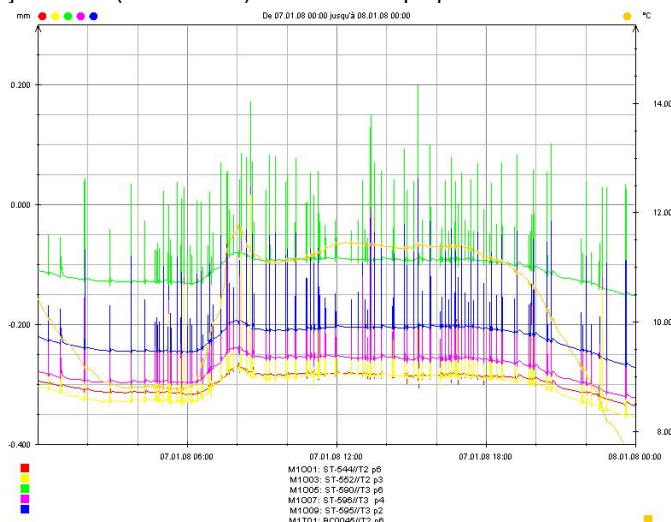


Ci-contre: Sonde de température vissée sur un extensomètre optique

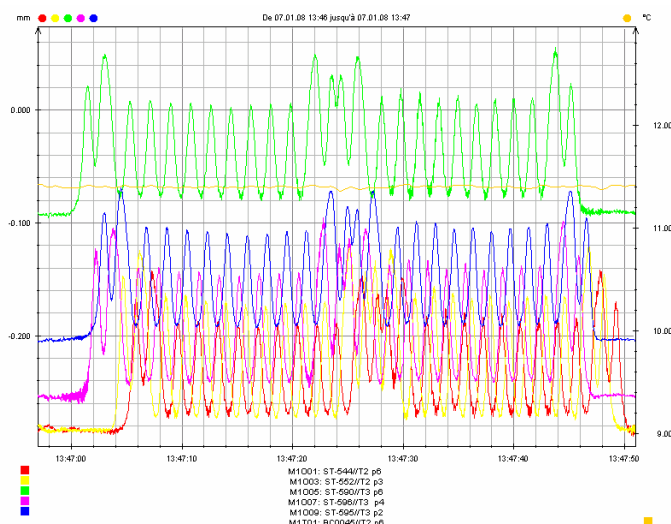
6.2. Traitement des données

Des enregistrements sont donc faits à chaque passage de train. Pour chaque enregistrement, le traitement consiste à extraire immédiatement les déformations maximales et à les comparer aux seuils fixés.

Exemple d'enregistrement journalier (07/01/2008) de 5 cordes optiques et d'une sonde de température.



Zoom sur l'enregistrement ci-dessus : passage d'une double rame TGV à 13h47 le 07/01/2008



En cas de dépassement d'un seuil préalablement fixé, déclenchement et transmission immédiate d'un message d'alerte aux services concernés.

6.3. Fixation des seuils d'alerte et d'alarme

Il a d'abord été convenu que l'alerte conduisait aux actions suivantes, dans un délai prescrit :

- examen détaillé de la mesure ayant déclenché l'alerte (niveaux de contrainte, vérification du retour élastique , vérification du nombre de dépassements...)
- inspection du capteur et de l'élément ayant déclenché l'alerte.

L'alarme conduit, elle à l'arrêt immédiat du trafic, une inspection de la voie immédiate et si aucun défaut géométrique n'est observé, reprise du trafic au pas, jusqu'à l'inspection faite par un expert « ouvrages d'art » de la SNCF.

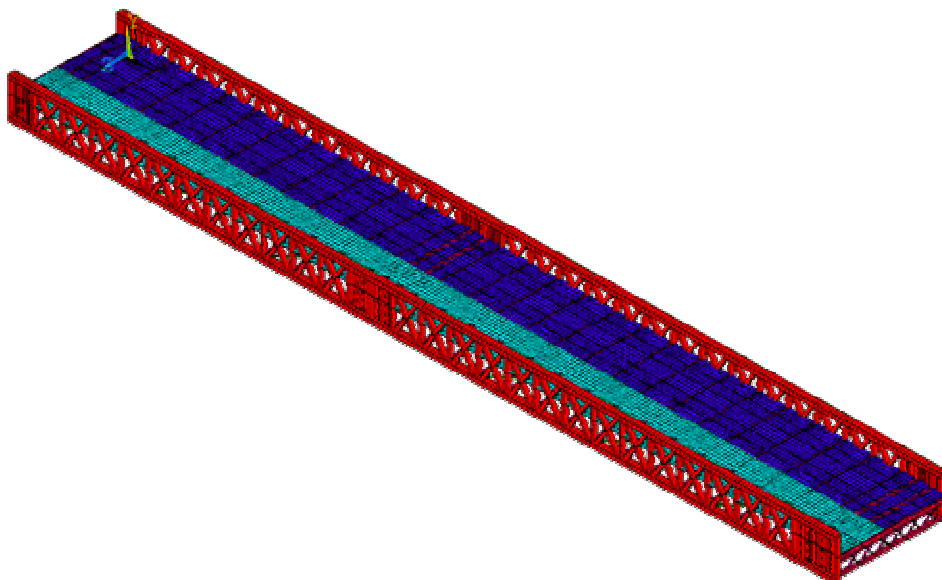
Les seuils ont été définis sur les bases suivantes :

- **alerte** : lorsque l'allongement maximal mesuré sous les trains réels dépasse de plus de 10% (soit 0,45 mm pour la corde optique placée en 2) l'allongement correspondant mesuré dans la période précédente. Si nécessaire, le seuil d'alerte pourra être recalé.
- **alarme** : allongement (très important) correspondant à une contrainte moyenne dans la pièce de 220 Mpa environ, (déformation mesurée 2 mm), voisine de la valeur basse de la limite de résistance du matériau.

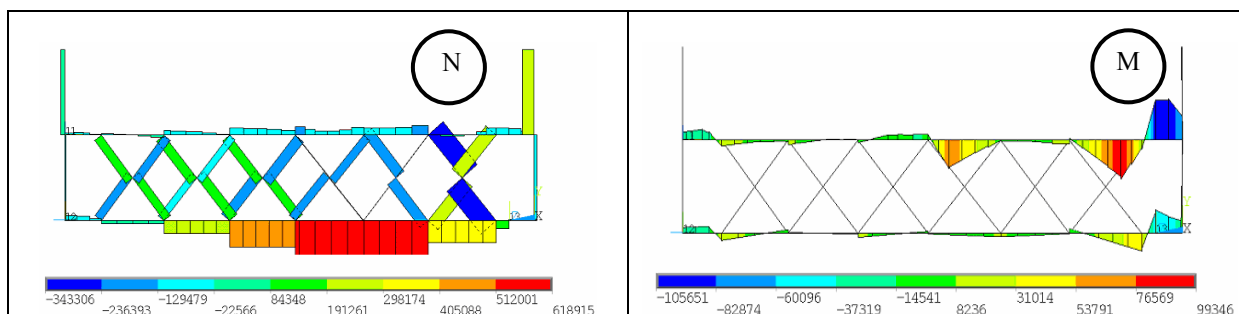
Ces seuils ont pu être fixés à partir de l'analyse des mesures réalisées depuis août 2007, mesures qui donnent les valeurs maximales et moyennes par capteurs mais aussi avec l'aide de calculs des contraintes dans la structure sous diverses charges (trains dont le TGV, température, gradients thermiques). Des modèles de structure intégrant des avaries (ruptures de pièces...) ont également été utilisés.

Des exemples de modélisations sont donnés ci-après.

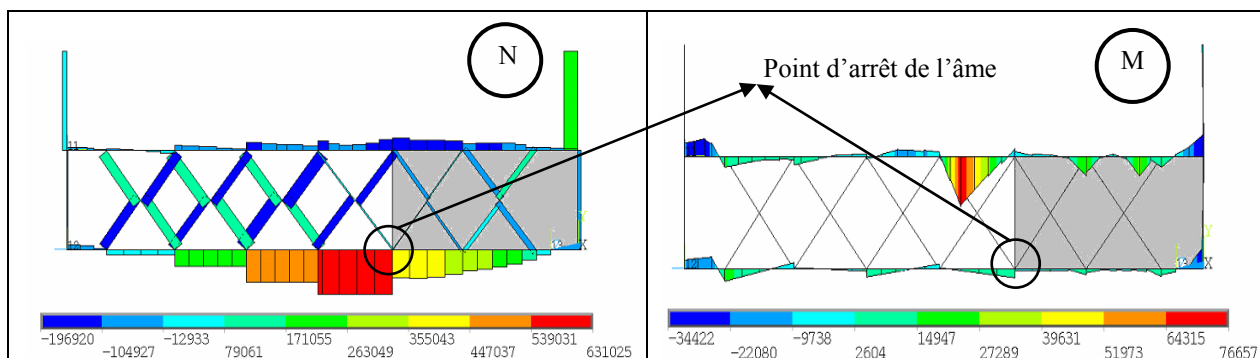
Modélisation
de 2 travées
du tablier



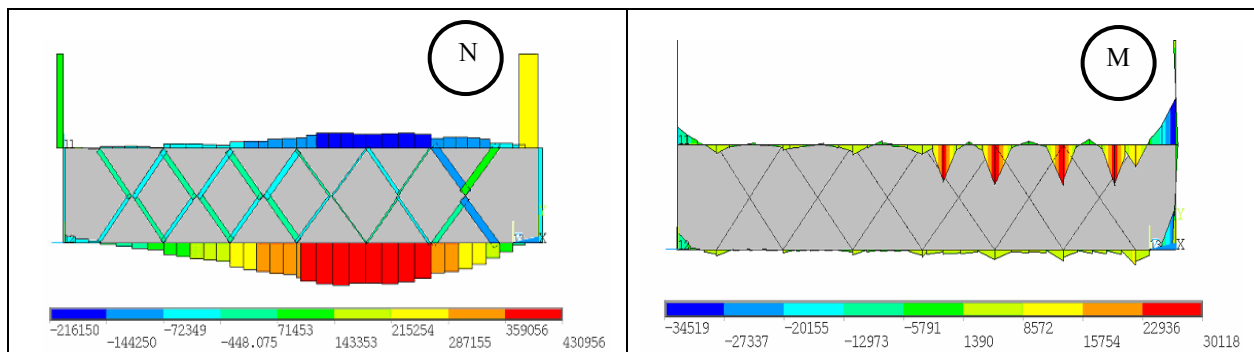
Cette modélisation a permis de quantifier le niveau des contraintes existant dans l'ouvrage, notamment pour les pièces de pont. Il a permis de mettre en évidence l'intérêt du renforcement réalisé sur ces pièces par ajout d'une âme pleine sur toute leur longueur en travée 1, partiellement sous la zone voie ferrée sur les autre travées. Les figures ci-après illustrent les cas étudiés sous l'action des charges ferroviaires.



Pièce de pont diagramme d'effort normal et de moment de flexion : situation d'origine



Pièce de pont diagramme d'effort normal et de moment de flexion : renforcement partiel (travées 2 à 5)



Pièce de pont diagramme d'effort normal et de moment de flexion : renforcement total (travées 1)

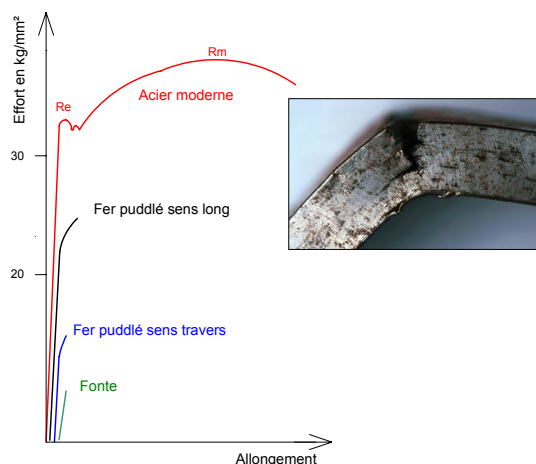
La comparaison de ces différents états de la structure met en évidence ses 2 points sensibles, d'une part l'attache de la membrure supérieure sur la poutre qui est le siège d'efforts de flexion important, de l'autre le niveau de traction de la membrure inférieure à mi travée.

En résumé, le renforcement total de la pièce de pont a permis de réduire de 30 % l'effort de traction au point 2 et de 70 % le moment de flexion au point 1. Dans les zones renforcées partiellement, seul l'effort de flexion a été réduit de 70 %.

Ces résultats confirment l'intérêt d'effectuer un suivi de ces zones sensibles, déjà mises en évidence par l'analyse des avaries décrite ci-avant.

L'estimation du niveau de contrainte total, intégrant les charges permanentes et le chargement ferroviaire (majoré dynamiquement) sur les deux voies conduit à une valeur extrême dans la membrure inférieure proche de 260 MPa.

Cette valeur est à comparer à la limite de rupture du fer puddlé, de 200 MPa environ pour le sens travers long, rappelée ci-dessous.



Cette valeur correspond à un chargement équivalent à deux trains lourds de FRET agissant simultanément. Elle confirme que le niveau de contrainte est important et très proche des limites de résistance du matériau. Elle n'intègre pas les réductions de section constatées.

L'analyse des allongements mesurés sous passage de TGV et leur comparaison avec les calculs conduit à une contrainte moyenne mesurée de 20 Mpa environ au point 2, entre 5 % et 10 % inférieure à celle obtenue par les calculs.

Résistance du fer puddlé

6.4. Alertes « fonctionnelles »

Pour limiter au maximum les fausses détections, des alertes « fonctionnelles » sont envoyées au mainteneur du système. Elles permettent de s'assurer du fonctionnement correct du système de mesure. Elles sont déclenchées en cas de défaut d'alimentation, de défaut de ligne ou du système de transmission, de défaut du capteur ou de défauts dans la station de monitoring.

6.5. Rapports mensuels de mesures

Dans tous les cas, à savoir en présence ou en absence d'alertes et d'alarme, un état mensuel des mesures et du fonctionnement du système est transmis sous forme d'un fichier exportable sur tableur donnant les valeurs maximales de chaque capteur.

Sur la même base mensuelle, un récapitulatif des principales mesures et des principaux événements, est fourni sous la forme d'histogrammes. Deux des classes des histogrammes ont été ajustées avec suffisamment de précision pour être représentatives des circulations TGV sur les voies 1 et 2. Deux histogrammes sont fournis : mode « mois écoulé » et mode cumulé.

6.6. Mise en œuvre du système

Une phase d'essai a tout d'abord été réalisée entre les mois d'août 2007 et février 2008, sur 5 pièces de pont, de manière à valider le fonctionnement, le traitement des données, leur transfert et le déclenchement des alarmes. La phase d'instrumentation complète (42 capteurs) vient de s'achever. Le système est opérationnel.

La phase opérationnelle sera effective jusqu'au remplacement de l'ouvrage prévu en 2012. Le système devra permettre de poursuivre la surveillance pendant la réalisation des travaux de construction de l'ouvrage neuf, implanté tout à côté de l'existant.

7. CONCLUSIONS

Cette expérience - mettre en œuvre un système de surveillance d'un ouvrage avec instrumentation et télésurveillance- n'est pas nouvelle pour la SNCF. Mais elle présente ici quelques particularités notables :

- utilisation systématique de capteurs à fibre optique
- analyse de risque préalable et mise au point d'un véritable plan (stratégique) d'instrumentation
- confrontation pour cette analyse de risque des calculs avec les premières mesures. Même pour des structures composées de barres, les modèles et les calculs doivent impérativement rendre compte de manière correcte des mesures.
- essai d'instrumentation vis-à-vis d'un risque particulièrement difficile à traiter : celui de la rupture fragile d'éléments d'un pont métallique ancien (datant du XIX ième siècle)

Il est encore trop tôt pour affirmer que ce système de monitoring remplit parfaitement sa mission de surveillance d'un ouvrage mais, tout laisse à penser (l'ensemble des précautions prises, les calculs et analyses réalisés) qu'il va contribuer au maintien de la sécurité ferroviaire sur cet ouvrage, jusqu'en 2012. En effet, ce système se substitue à l'œil de l'expert qui ne peut pas être là en permanence ou qui ne peut pas accéder aux points critiques de la structure. De plus, il permet de quantifier des déformations et de donner sans délai l'alerte (après que l'expert ait défini les bons seuils).

Il faut ajouter que l'inspecteur, tant qu'il peut aller sur place, peut avoir une vision plus large et plus généraliste de l'état de l'ouvrage, au delà de ce que permet un système de mesures tel que celui réalisé à Bayonne.

Enfin, il convient de nommer et de remercier les intervenants en dehors de la SNCF, sans qui ce système n'aurait pas pu voir le jour :

MM	Olivier SCHOEN	RFF
	Jean François BELGODERE	Société GEOSCAN (conception et la mise en œuvre du système)
	Charles VIANO	Société OSMOS fournisseur du système de surveillance