

LES HAUBANS DU VIADUC DE MILLAU

THE MILLAU VIADUCT STAY CABLES

Jean-Luc BRINGER, Benoît LECINQ, Manuel PELTIER

FREYSSINET

Marc BUONOMO

EIFFEL

Claude SERVANT

EIFFAGE TP



Photo 1. Le viaduc / *The viaduct*

1. PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Le viaduc de Millau est un ouvrage de 320 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, est concessionnaire de l'ouvrage pour 75 ans.

Ce viaduc, d'une hauteur de 343 m au sommet des pylônes, est le dernier maillon de l'autoroute A75 Clermont-Ferrand / Béziers.

1. OVERVIEW OF THE STRUCTURE

The Millau Viaduct is a 320 million euro structure financed and built under a concession agreement by the Eiffage group. Its subsidiary, Compagnie Eiffage du viaduc de Millau, holds the concession on the structure for 75 years.

The viaduct, which is 343 m high to the top of the pylons, forms the last link in the chain of the A75 motorway between Clermont-Ferrand and Béziers.

Ouvrage exceptionnel multihaubané d'une longueur de 2 460 m, le viaduc de Millau est légèrement courbe en plan et en rampe constante de 3,025% du nord vers le sud.

An extraordinary multi-span-cable-stay structure 2,460 m in length, the Millau Viaduct is slightly curved and has a constant gradient of 3.025% from north to south.

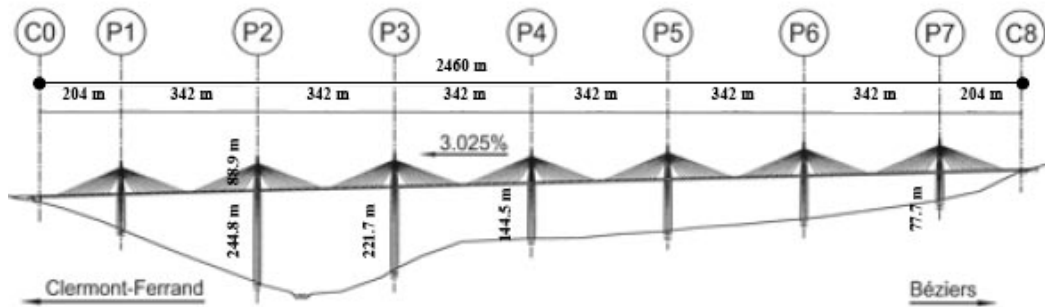


Fig. 1. Vue longitudinale du viaduc / Longitudinal view of the viaduct

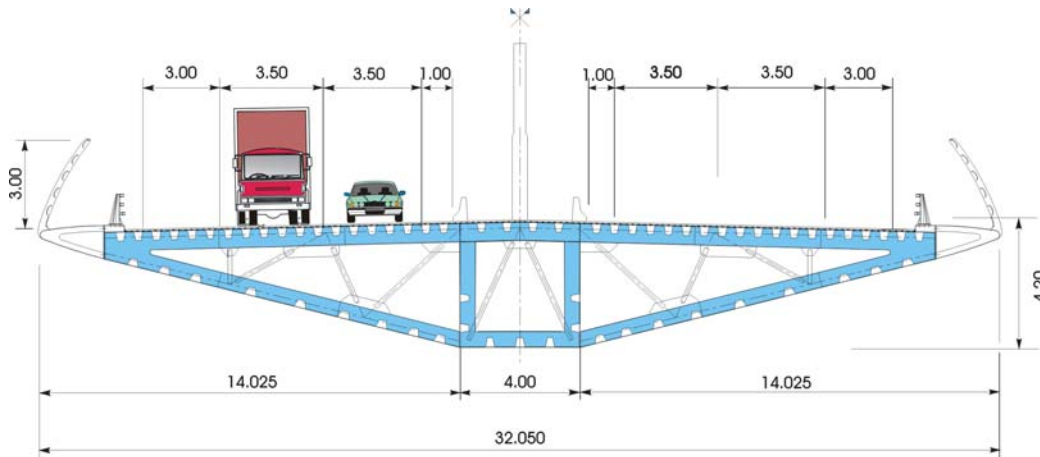


Fig. 1a. Coupe transversale du viaduc / Transversal view of the viaduct

Le profil en travers de l'autoroute est du type 2X2 voies de circulation encadrées chacune par une bande d'arrêt d'urgence de 3 m et une bande dérasée de gauche de 1 m.

A cross-section of the motorway reveals 2 x 2 lanes, each flanked by a 3 m hard shoulder and a 1 m clear strip to the left of each carriageway.

L'ouvrage est également équipé de barrières lourdes et d'écrans de protection des usagers contre le vent latéral.

The structure is also equipped with heavy barriers and screens to protect users against side winds.

La largeur du terre-plein central (4,45 m) est conditionnée par l'encombrement des dispositifs du haubanage qui est à nappe axiale. Le profil en travers qui résulte de ces contraintes conduit à une largeur totale de tablier de 27,75 m.

The width of the central reservation (4.45 m) is determined by the spacial requirements of the central plane of cable-stays. As a result, the cross-section has a total width of 27.75 m.

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 : 245 m et P3 : 221 m).

These specifications mean that the structure holds the world records for the longest multi-span cable-stayed bridge and the bridge with the tallest piers (P2: 245 m and P3: 221 m).

Les piles sont constituées d'un fût unique en forme de caisson dans sa partie basse qui se dédouble dans sa partie supérieure.

The lower section of the piers is a single shaft in the form of a caisson, which becomes a double shaft in the upper section.

Les fûts dédoublés des piles sont précontraints sur toute leur hauteur à l'aide de huit câbles 19T15S.

The piers' double shafts are prestressed over their entire height by means of eight 19T15S cables.

Toutes les piles reposent sur un système de fondation semi-profonde constitué par une semelle rectangulaire d'épaisseur variant de 3,5 m à 5 m qui surmonte quatre puits marocains de 5 m de diamètre et de 9 à 16 m de longueur ancrés dans le substratum rocheux.

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 en partie courante.

Le raidissage transversal du tablier est assuré par des diaphragmes en treillis espacés de 4,17 m en zone courante. Le raidissage longitudinal est assuré par des augets traversant des diaphragmes.

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. Le haubanage du type axial comporte onze haubans par nappe disposés en semi-éventail et espacés de 12,51 m.

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

La liaison pylône-tablier est en encastrement réalisé par une entretoise métallique dans le tablier au droit de chaque jambe de pylône.

La hauteur totale des pylônes est de 87 m. Les jambes du Y ont une hauteur de 38 m et elles sont constituées par deux caissons métalliques raidis dont la dimension transversale est de 3,50 m et la dimension longitudinale de 4,75 m. Chaque jambe de pylône est surmontée par un mât de hauteur 49 m dans lequel sont ancrés les haubans.

Le tablier métallique de l'ouvrage a été réalisé par phases successives d'assemblage et de lancement à partir des plate-formes aménagées derrière les culées C0 et C8.

Depuis la plate-forme côté sud, on réalise une partie d'ouvrage de 1743 m de longueur. Une autre partie d'ouvrage de 717 m de longueur est réalisée depuis la plate-forme côté nord.

Les panneaux qui constituent les caissons centraux sont fabriqués dans l'usine d'Eiffel à Lauterbourg puis transportés à Fos-sur-Mer où ils sont assemblés et enfin acheminés sur le chantier par convois exceptionnels au rythme de deux caissons par semaine.

Le caisson central du tablier est réalisé par élément de 15 à 22 m de longueur d'un poids maximal de 90 tonnes.

Chaque partie latérale est constituée de quatre panneaux et d'un caisson de rive. Les panneaux dont la largeur est variable entre 3,90 m et 4,25 m et la longueur variable de 20 à 24 m sont livrés sur le chantier par convois exceptionnels. Le poids unitaire de chacun des panneaux est inférieur à 40 tonnes.

All of the piers are supported by a variable-depth foundation system made up of a rectangular footing between 3.5 and 5 m thick on top of four Moroccan pits 5 m in diameter and between 9 and 16 m long, anchored in the bedrock.

The deck is made up of a trapezoid metal box with a 4.20 m section and orthotropic upper decking made up of steel plates 12 to 14 mm thick.

The transverse stiffening of the deck is provided by mesh diaphragms at intervals of 4.17 m on the main run. The longitudinal stiffening is provided by ribs passing through diaphragms.

The deck rests on the piers utilising spherical bearings that are fixed to the piers using prestressing cables.

Each span is supported by means of stay cables anchored on either side of the pylon. The axial stays comprise eleven stay cables per plane, arranged in a half-fan at 12.51 m intervals.

The steel pylons are an inverted Y shape, oriented longitudinally and continuing on from the double shafts of the piers.

The pylons are embedded in the deck by means of a steel crossbeam in the deck at each pylon arm.

The total height of the pylons is 87 m. The arms of the Y are 38 m high and are made up of two stiffened metal caissons 3.50 m across and 4.75 m long. Each pair of arms is topped with a 49 m mast into which the stay cables are anchored.

The steel deck on the structure was built in successive assembly and launching phases from the platforms installed behind the abutments, C0 and C8.

A 1,743 m long section of the structure was built from the south platform, and another section 717 m in length was built from the north platform.

The panels that form the central boxes were manufactured at the Eiffel plant in Lauterbourg and then taken to Fos-sur-Mer, where they were assembled and then transported to the site as abnormal loads at a rate of two boxes per week.

The central box of the deck is made of elements between 15 and 22 m long with a maximum weight of 90 tonnes.

Each side section is made up of four panels and an end box. The panels, which vary in width between 3.90 m and 4.25 m, and in length between 20 and 24 m, were delivered to site as wide loads. Each of the panels weighs less than 40 tonnes.

Les opérations de lancement se terminent par le clavage des extrémités de porte-à-faux au milieu de la travée P2-P3. Toutes les grandes travées, exceptée la travée P2-P3 au-dessus du Tarn, comportent une palée provisoire à mi-travée. La hauteur de la palée provisoire (Pi2 la plus haute) est de 173 m.

The launching operations ended with the keying of the cantilever ends in the middle of span P2-P3. All of the long spans, apart from span P2-P3 above the river Tarn, had temporary column supports at mid-span; the tallest of these, Pi2, was 173 m high.



Photo. 1a. Le viaduc / The viaduct

2. TECHNOLOGIE DES CÂBLES

2. CABLE TECHNOLOGY

Freyssinet s'est vu confier par la société Eiffel, en janvier 2002, la prestation de fourniture et d'installation des haubans du viaduc.

In January 2002 Eiffel awarded Freyssinet the contract for the supply and installation of the stay cables for the viaduct. This article sets out the technical aspects of the stay cables for the project as proposed by Freyssinet and approved by Eiffel.

Le hauban Freyssinet HD, qui peut comprendre de 1 à 169 torons, repose dans son principe sur l'indépendance de chacun de ces éléments à tous les niveaux : ancrage, protection contre la corrosion, installation, mise en tension voire remplacement.

The principle of the Freyssinet HD stay cable, which can have between 1 and 169 strands, is based on the independence of each of these elements at every level: anchoring, corrosion protection, installation, tensioning and even replacement.

La conception des câbles est ainsi fidèle à l'esprit du projet : utilisation de technologies et techniques éprouvées pour limiter les aléas. Cependant, le nouveau cadre réglementaire et les contraintes liées aux méthodes de lancement du tablier ont conduit à optimiser le dimensionnement des câbles et a nécessité des aménagements technologiques spécifiques.

The design of the cables is therefore in line with the spirit of the project, namely the use of tried and tested technologies and techniques to reduce the unknowns. However, the new regulatory framework and the constraints linked to the deck launching methods led to the optimisation of the size of the cables and required specific technological measures.

Les haubans sont constitués de 55 à 91 mono-torons de diamètre 15.7 mm galvanisés à chaud, revêtus de cire pétrolière et gainés par une couche de polyéthylène haute densité semi-adhérente. Les torons ont une contrainte de rupture de 1860 MPa.

The stay cables are made up of 55 to 91 hot galvanised monostrand tendons 15.7 mm in diameter, coated in petroleum wax and sheathed in a layer of semi-adherent high density polyethylene. The strands have a breaking strength of 1,860 MPa.

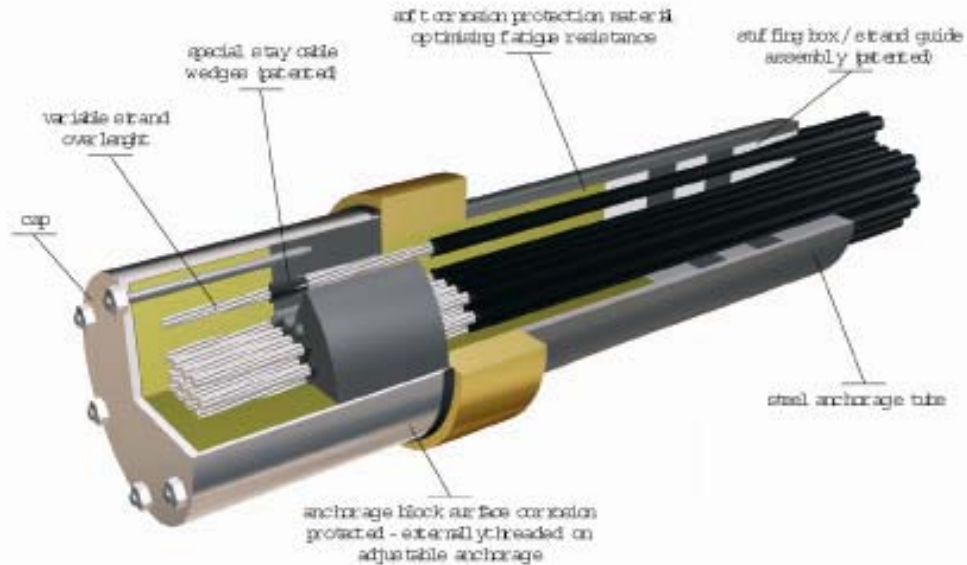


Fig. 2. Testée à une pression supérieure à 10 bars, l'étanchéité du guide presse-étoupe (1) mis au point par Freyssinet prévient la corrosion des câbles.
Tested to a pressure of over 10 bar, the sealing of the stuffing box (1) developed by Freyssinet prevents the corrosion of the cables.

Les ancrages employés bénéficient des dernières évolutions mises au point par Freyssinet :

- les torons sont individuellement ancrés par des clavettes conçues pour résister à la fatigue (résistance de 300 MPa) ;
- un presse-étoupe de dernière génération situé en avant de l'ancrage assure le filtrage des contraintes de flexion ainsi que l'étanchéité de la zone de confinement autour du bloc d'ancrage ;
- une zone de filtrage brevetée écrête efficacement des contraintes de flexion en les divisant par deux.

Tous les ancrages du tablier sont réglables au moyen d'un vérin annulaire. Certains ancrages ont des courses importantes, de l'ordre de 700 mm, pour permettre les ajustements nécessaires lors des réglages pendant le poussage.

Pour chaque hauban, le faisceau de toron est logé dans une gaine aérodynamique en polyéthylène haute densité dont la couche extérieure est spécialement formulée par Freyssinet pour résister à l'altération des Ultra Violets. Deux bourrelets hélicoïdaux sur la surface externe de la gaine mis au point à l'occasion du pont de Normandie et de celui d'Øresund empêchent la formation de filets d'eau par temps de pluie pour prévenir les vibrations de haubans liées au phénomène « pluie & vents » (fig.3)

Le projet de Millau est la première application des nouvelles recommandations de la CIP pour les haubans (Commission Interministérielle de la Précontrainte) publiées en février 2002.

The anchors used incorporate the latest developments made by Freyssinet:

- *the strands are individually anchored using wedges designed to withstand fatigue (300 MPa fatigue resistance);*
- *a latest generation stuffing box located in front of the anchor ensures the filtering of the bending stresses as well as the sealing of the containment zone around the anchor block;*
- *a patented filtering zone efficiently limits the bending stresses, to half the 'unfiltered value'.*

All of the deck anchors can be adjusted by means of an annular jack. Some anchors have a long adjustment capacity in the order of 700 mm, to allow for the adjustments necessary during launching.

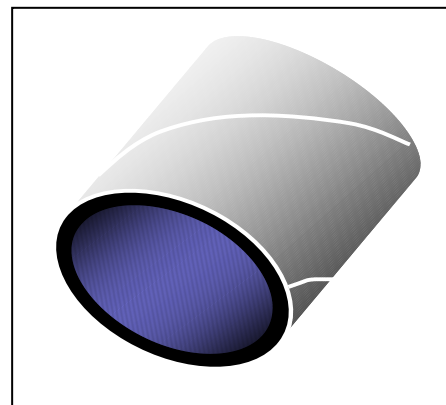


Fig. 3

En accord avec le bureau d'études et Eiffel, compte tenu de la haute performance en fatigue, il a été décidé de tirer le meilleur parti de cette nouvelle réglementation en faisant travailler les câbles à 50% de leur force de rupture garantie sous sollicitations de service (au lieu de 45% habituellement). Cette limitation est exploitable dans la mesure où les contraintes de flexion des câbles sont correctement filtrées (contrainte de flexion limitée à 50 MPa au bloc d'ancrage) et suffisamment amorties. Des conditions qui sont remplies par les câbles proposés par Freyssinet qui sont tous équipés d'amortisseurs. De plus, l'ancrage dispose d'une pièce de transition guidant les torons en avant de l'ancrage et dont la forme limite l'influence de déviation en partie courante et conduit à des contraintes de flexion admissibles au niveau des blocs d'ancrages. La nouvelle réglementation peut donc être utilisée au mieux.

La conception des zones d'ancrage permet de bénéficier avantageusement du système de déshumidification du tablier. Dans le tablier, l'ancrage et sa partie courante jusqu'au niveau de l'amortisseur (environ 1 m au-dessus du tablier) sont en atmosphère déshumidifiée. Une membrane d'étanchéité placée autour du câble permet de limiter le débit de fuite par le hauban. Enfin, la conception en « lame de persienne » des ancrages dans le tablier offre un accès visuel simple de la partie courante du câble (faisceau de toron) depuis l'intérieur du tablier.

3. QUALIFICATION DU SYSTÈME

La qualification du système de haubanage conformément aux nouvelles recommandations a nécessité la réalisation de nombreux essais. Parmi ceux-ci, deux essais essentiels sont réalisés sur des câbles en « vraie grandeur ». Un essai de fatigue d'un câble de 55 torons sous une variation de contrainte de 200 MPa pendant 2 millions de cycles a été mené de façon concluante au LCPC de Nantes. (fig.4)

Au préalable et conformément à cette nouvelle réglementation, des câbles mono-torons ont été testés sans aucune rupture de fil élémentaire pendant 2 millions de cycles sous une variation de contrainte de 300 MPa.

La force maximale, lors de l'essai de traction ultérieur, a dépassé les 95% de FRG pour atteindre 15220 kN, soit 99% de la charge de rupture garantie. Cette force maximale atteinte lors de l'essai représente 96% de F réel pour 92% mini demandé (fig.5).

For each stay cable, the strand bundle is housed in an aerodynamic high density polyethylene sheath, the outer layer of which is specially formulated by Freyssinet to resist ultraviolet weathering. Two helical contour ridges on the outer surface of the sheath, developed for the Pont de Normandie and Øresund bridges, prevent the formation of streams of water in rainy weather to avoid the vibration of the stay cables linked to the combined action of the wind and rain (fig.3).

The Millau project is the first application of the new CIP (Interministerial Prestressing Committee) recommendations for stay cables, published in February 2002. In conjunction with the design office and Eiffel, given the excellent performance of the Freyssinet stay in terms of fatigue resistance, the decision was made to take full advantage of the new regulations by making the cables work at 50% of their guaranteed breaking strength under operating stress (instead of the usual 45%). This limitation is workable as long as the bending stresses on the cables are correctly filtered (bending stress limited to 50 MPa at the anchor block) and sufficiently damped. These conditions are met by the cables proposed by Freyssinet, which are all equipped with dampers. Furthermore, the anchor has a transition component that guides the strands in front of the anchor the shape of which limits the impact of deviation on the main run and leads to acceptable bending stresses at the anchor blocks. The new regulations were therefore used to the best possible advantage.

The design of the anchor zones allows for advantage to be taken of the deck dehumidification system. In the deck, the anchor and its main run up to the damper (approximately 1 m above the deck) are in a dehumidified atmosphere. A waterproof membrane placed around the cable limits the leakage rate around the stay cable. Finally, the "louvre" design of the anchors in the deck gives very simple visual access to the main run of the cable (strand bundle) from the inside of the deck.

3. SYSTEM APPROVAL

Numerous tests had to be carried out for the approval of the cable-stay system in accordance with the new recommendations. These included two essential tests on "life-size" cables. A fatigue test on a 55-strand cable under a stress variation of 200 MPa for 2 million cycles was carried out conclusively at the LCPC in Nantes. (fig. 4)

Prior to this, in accordance with the new regulations, monostrand tendons were tested without any constituent wire breakage during 2 million cycles under a stress variation of 300 MPa.

The maximum force during the subsequent tensile test exceeded 95% of guaranteed breaking strength to reach 15,220 kN, i.e. 99% of the guaranteed failure load. This maximum force reached during the test represents 96% of actual strength, when the minimum required was 92% (fig. 5).

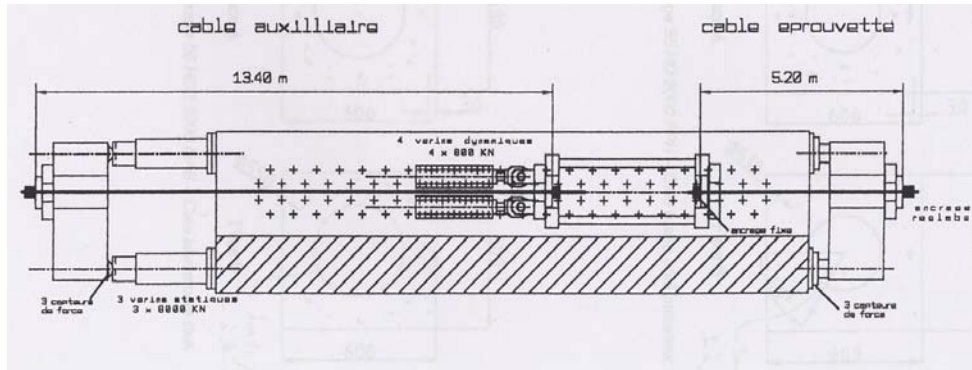


Fig. 4. Banc de fatigue des câbles – Implantation / Cable test bed – Installation

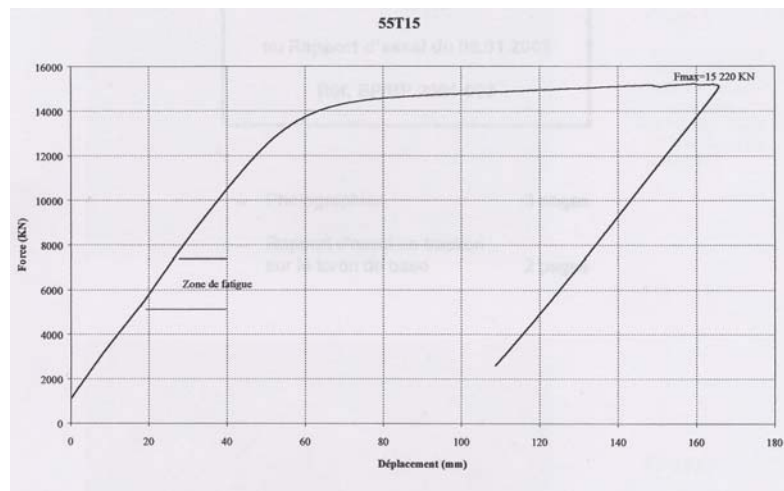


Fig. 5. Courbe d'essai de traction reconstituée à partir des courbes de mise en tension initiale avant essai de fatigue et d'essai de traction finale
Tensile test curve reconstituted from the initial tensing curves before fatigue test and final tensile test

Par ailleurs, la durabilité des ancrages est étroitement liée à leur étanchéité et à leur protection contre la corrosion.

Dans le système Freyssinet, l'étanchéité du guide presse-étoupe a résisté, au cours de tests, à une pression supérieure à 10 bars.

Un autre essai caractérisant l'étanchéité des zones d'ancrages a été conduit sur une durée de 7 semaines pendant lesquelles le câble, confiné dans un tube rempli d'eau de 3 m, subissait un cycle de 250 déviations imposées toutes les semaines. Un cycle de variation de la température de l'eau entre 20°C et 70°C se superposait à ce cycle mécanique pour simuler les conditions réelles de l'environnement du câble. La dissection des câbles en fin d'essai n'a révélé aucune présence d'eau.

C'est la première fois que l'étanchéité a été éprouvée par le nouveau test CIP (photos 2 et 3).

Furthermore, the durability of the anchors is closely linked to their sealing and corrosion protection.

In the Freyssinet system, the sealing of the stuffing box withstood a pressure of more than 10 bar during testing.

Another test characterising the sealing of the anchor zones was carried out over a period of 7 weeks during which the cable, confined in a 3 m tube filled with water, underwent a cycle of 250 deviations imposed each week. A water temperature variation cycle between 20°C and 70°C was imposed in addition to the mechanical cycle to simulate the actual environmental conditions of the cable. When the cables were dissected at the end of testing, no water was found.

This was the first time that the sealing had been tested by the new CIP test (photos 2 and 3).



Photos 2 et 3

4. LE PHASAGE DES TRAVAUX

La pose des haubans se déroule en trois phases distinctes nécessitant une mobilisation spécifique pour chacune d'entre elles.

En juin 2003, les douze premiers haubans de P3 sont installés pour permettre le début du lancement de la partie sud du tablier. Ces haubans définitifs seront utilisés pendant tout le lancement de la partie sud du tablier pour soutenir la partie lancée à l'avant du tablier.

En novembre 2003, les douze haubans de P2 sont installés pour permettre le début du lancement de la partie nord du tablier. L'opération est identique à celle réalisée sur P3 cinq mois plus tôt.

De juin 2004 à août 2004, les 130 derniers haubans ont été posés en suivant le rythme d'installation des pylônes P1, P4, P5, P6 et P7. Les travaux de montage des câbles se sont déroulés de front sur deux pylônes et ont été effectués avec un effectif d'une centaine de personnes.

Entre ces différentes phases, des opérations de réglages des câbles et des aiguilles provisoires ont été réalisées conformément au phasage déterminé par le bureau d'études BEG.

5. LES OPÉRATIONS DE LANCÉAGE

Le lancement du tablier a ainsi été réalisé en utilisant, pour chacune des deux parties poussées, un pylône haubané pour reprendre le porte à faux de la section avant. Au cours de ce poussage, les tensions de ces haubans varient continuellement en fonction de la position du pylône. Effort maximal juste avant l'accostage du tablier sur une palée ou une pile et effort minimal lorsque le pylône se trouve à mi-travée entre une pile et une palée.

4. THE PHASING OF THE WORK

The stay cables were installed in three distinct phases that each required specific resources.

In June 2003, the first twelve stay cables on P3 were installed to allow the launching of the southern section of the deck to commence. These permanent stay cables were used throughout the launching of the southern section of the deck to support the launched part at the front of the deck.

In November 2003, the first twelve stay cables on P2 were installed to allow the launching of the northern section of the deck to commence. The operation was identical to the one carried out on P3 five months earlier.

Between June and August 2004, the last 130 stay cables were installed in line with the construction rate of pylons P1, P4, P5, P6 and P7. The cable assembly work took place on two pylons simultaneously and was carried out with a workforce of around one hundred people.

Between these different phases, the temporary cable and cross-tie adjustments were carried out in accordance with the phasing set out by the BEG design office.

5. THE LAUNCHING OPERATIONS

For each of the two launched sections, the deck was launched using a cable-stayed pylon to support the cantilever of the front section. During launching, the tension in the stay cables varied constantly depending on the position of the pylon, with maximum force just before the deck reached a temporary pile or a pier, and minimum force when the pylon was mid-span between a pier and a temporary pile. These specific stresses during the launching phases were analysed and it was considered that there was no reason why the stay cables used during the launching phase should not then be adopted to form the permanent stay cables. This is why the decision was made to install the permanent stay cables right from the outset. To ensure their integrity until the end of launching, several practical measures were taken:

- The large deflections in the cables resulting from the variations in tension required the guiding of the cables at their extremities to avoid contact with the anchor tubes. Guide devices were therefore installed on the deck and on the pylon (photo 4).

Mis à part ces sollicitations spécifiques aux phases de lancement, il n'y a aucune raison pour que ces haubans utilisés en phase de lancement ne soient pas les haubans définitifs. C'est donc le choix d'installer les haubans définitifs dès le départ qui a été fait. Pour s'assurer de leur intégrité jusqu'à la fin des lancements, plusieurs dispositions constructives ont été retenues :

- Les grandes flèches des câbles résultant des importantes variations de tensions nécessitent un guidage des câbles à leur extrémité pour éviter le contact sur les tubes d'ancrages. Des dispositifs de guidage ont donc été installés sur le tablier et sur le pylône (photo 4).
- Pour prévenir d'éventuelles vibrations pendant la construction, alors que les amortisseurs définitifs ne sont pas en place, des aiguilles provisoires sont installées à chaque phase d'arrêt entre les lancements. Outre le léger amortissement qu'elles apportent, elles augmentent les fréquences propres de vibration des haubans en rigidifiant les câbles.
- Enfin les tensions dans les haubans sont suivies lors des phases de lancement pour vérifier leur bon comportement au regard du modèle théorique (fig. 6).



Photo 4

- To prevent any vibrations during construction, when the permanent dampers are not in place, temporary cross-ties were installed at each interim period between launches. In addition to the slight damping they provide, they increase the natural vibration frequencies of the stay cables by stiffening the tendons.
- Finally, the tension of the stay cables is monitored during the launching phases to check that they are behaving in accordance with the theoretical model (fig. 6).

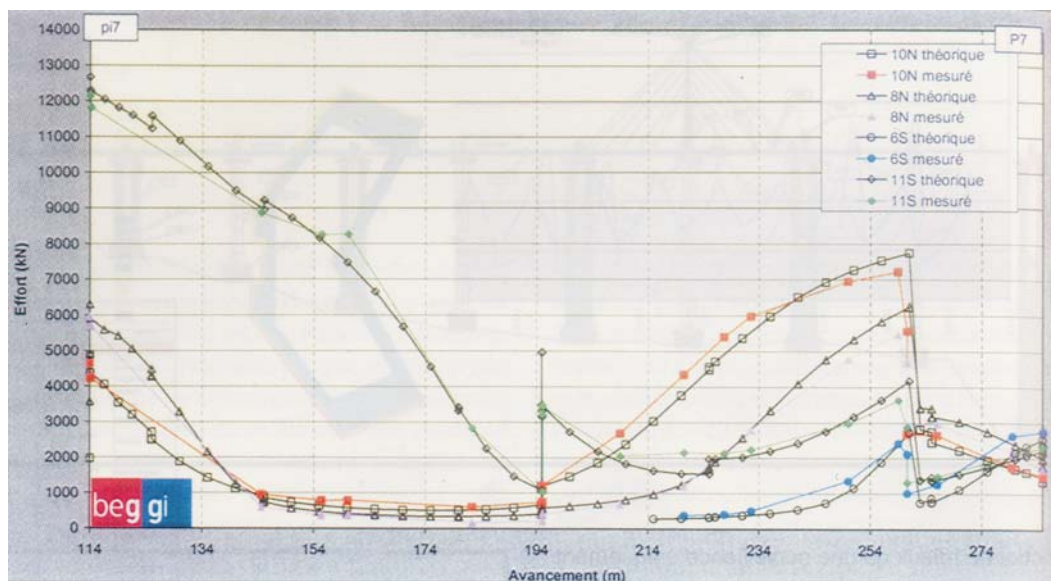


Fig. 6 Lancement L4S – Efforts dans les haubans / Launch L4S – Stresses in the stay cables

De juin 2003 à avril 2004, le lancement du tablier opéré au cours de « fenêtres météo » d'une durée moyenne de trois jours, mobilise doublement les hommes de Freyssinet. Au niveau des piles et des palées provisoires installées pour diviser chaque travée de 342 m en sous-travées de 171 m, il s'agit d'assurer le décloUAGE du tablier puis son reclouage après lancement.

From June 2003 to April 2004 the launching of the deck, which was carried out during "weather windows" lasting an average of three days, provided work for Freyssinet's men on two fronts, as the deck needed to be disconnected and then reconnected after launching at the piers and temporary column supports installed to divide each 342 m span into 171 m sub-spans.

Sur les pylônes P2 et P3, 24 haubans sont utilisés comme câbles de lancement supportant le porte-à-faux du tablier, et, sous l'effet des déformations du tablier, sont successivement mis en tension, lorsque le tablier aborde les palées et les piles, puis détendus. Afin de limiter et de contrôler les déformations angulaires qu'ils subissent au niveau des ancrages, ils sont équipés sur les pylônes et le tablier de selles de déviation spéciales. Ces dispositifs garantissent que les torons des câbles ne seront pas soumis à une contrainte combinée de traction et de flexion supérieure à 60 % de FRG, et que l'ancrage et les systèmes anticorrosion ne seront pas endommagés pendant le lancement.

6. L'INSTRUMENTATION DES 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.

Le choix des matériels, de leur nombre et 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.

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 un peu plus 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

On pylons P2 and P3, 24 stay cables were used as launching cables supporting the cantilever of the deck and, under the effect of the deformations of the deck, were successively tightened when the deck approached the piles and piers, and then slackened. In order to limit and control the angular deformation they underwent at the anchors, they were equipped with special deviation saddles on the pylons and deck. These devices ensure that the cable strands are not subjected to a combined tensile and bending stress in excess of 60% of guaranteed breaking strength, and that the anchor and corrosion protection systems are not damaged during launching.

6. STAY CABLE INSTRUMENTATION

The aims of the concession agreement with regard to the instrumentation of the stay cables were as follows:

- *monitoring of the tension in the stay cables throughout the lifetime of the structure*
- *analysis of the variations in tension in the stay cables under the effect of wind and road traffic*
- *examination of the vibration of the stay cables*
- *monitoring of corrosion, i.e. the durability of the stay cables.*

The choice of equipment, the number of units and their accuracy was preceded by a lengthy design phase with definition of the aims, the resources required to achieve these aims, their implementation over time and their cost.

The instrumentation installed by Advitam, a subsidiary of Freyssinet, is fitted to six stay cables on span P3 south (stay cables no. 2, 4, 6, 8, 10 and 11).

Four pieces of information are collected at each measurement point:

- *the temperature (temperature probe)*
- *the tension in the stay cable (force cell)*
- *the acceleration in the plane perpendicular to the stay cable (2-way accelerometer)*

Each sensor is connected to the acquisition unit, located slightly further south of pier P3 in the east caisson. The unit has the following functions:

- *data acquisition*
- *data storage*
- *definition of the acquisition parameters*

Chaque capteur est fourni avec sa fiche de vie détaillant les informations nécessaires à sa maintenance, ainsi que les données utiles telles que les certifications de calibration et leur fiche technique.

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

Pour le contrôle de l'état de corrosion des haubans, il a été fait appel à l'auscultation acoustique qui permet de détecter une rupture là où l'instrumentation structurelle enregistre un comportement. Les capteurs acoustiques SOUNDPRINT sont du type accéléromètre de technologie piézoélectrique. Ils sont de deux types :

- 12 capteurs uni-axiaux, collés sur les plaques d'ancrage des haubans sont utilisés pour la détection des ruptures de fils.
- 3 paires de capteurs en série, multi-axiaux, sont collés sous le tablier pour pouvoir discerner les bruits en provenance du tablier et ceux en provenance des haubans.

7. CONCLUSION

Le 27 août 2004, à 12 h 04 précisément, a été posé le dernier hauban du viaduc de Millau. Le délai très court de 12 semaines accordé pour le montage et la mise en tension des 154 haubans a été tenu, et avec lui l'engagement de Freyssinet à ne pas compromettre le planning de réalisation de l'ouvrage phare du groupe Eiffage, qui a été officiellement inauguré le 14 décembre par le Président de la République.

Mission accomplie pour l'essentiel, car une partie du personnel restera présente jusqu'à la mi-novembre pour s'acquitter d'ultimes et importantes tâches : réglages de tension des haubans, pose des amortisseurs, injections, etc.

8. INTERVENANTS

Concédant : Etat représenté par RCA et AIOA

Maître d'ouvrage : Compagnie Eiffage du viaduc de Millau.

Maître d'oeuvre : Groupement SETEC – SNCF Direction de l'Ingénierie

Architecte : Lord Norman Foster.

Concepteur : Michel Virlogeux.

Projet : Thalès, Arcadis ESG, Serf.

Études d'exécution : Greisch Ingénierie (BEG), Arcadis ESG, Thalès, Serf, Eiffage TP.

Each sensor is supplied with its life record, detailing the information necessary for its maintenance, together with useful information such as the calibration certificate and technical data sheet.

The data is recorded on the basis of predefined thresholds (wind: 15 m/s on average and acceleration: 1.5 m/s²).

Acoustic monitoring is used to check the state of corrosion of the stay cables; this method is used to detect a failure where the structural instrumentation records characteristics. The SOUNDPRINT acoustic sensors are accelerometers using piezoelectric technology. There are two types of sensor:

- *12 single-axis sensors, attached to the anchor plates of the stay cables, used to detect wire breakages.*
- *3 pairs of multi-axis sensors in series, attached underneath the deck, used to distinguish between noises coming from the deck and noises coming from the stay cables.*

7. CONCLUSION

On 27 August 2004, at 12.04 p.m. precisely, the last stay cable was fitted on the Millau Viaduct. The very short 12-week deadline set for the assembly and tensioning of the 154 stay cables had been met, together with Freyssinet's commitment not to compromise the Eiffage group's completion schedule for this key project, which was officially inaugurated on 14 December by the French President.

It was a case of mission largely accomplished, as some of the personnel stayed until mid-November to carry out some final, important tasks, such as adjusting the tension of the stay cables, fitting dampers, grouting, etc.

8. PARTICIPANTS

Concession grantor: The French government, represented by RCA and AIOA.

Owner: Compagnie Eiffage du viaduc de Millau.

Engineer: SETEC - SNCF Direction de l'Ingénierie consortium.

Architect: Lord Norman Foster.

Designer: Michel Virlogeux.

Project: Thalès, Arcadis ESG, Serf.

Execution methods: Greisch Ingénierie (BEG), Arcadis ESG, Thalès, Serf, Eiffage TP.

Entreprises : Eiffage TP (mandataire), Eiffel.

Entreprise spécialisée : Freyssinet

Main contractors: Eiffage TP (agent), Eiffel.

Specialized Contractor: Freyssinet.

9. PRINCIPALES QUANTITÉS

- Bétons : 90 000 m³
- Aciers passifs : 15 000 tonnes
- Aciers de charpente métallique :
 - Tablier : 36 000 tonnes
 - Pylônes : 4 600 tonnes
- Haubans : 1 500 tonnes
- Précontrainte des piles : 200 tonnes

9. KEY FIGURES

- *Concrete: 90,000 m³*
- *Passive steel: 15,000 tonnes*
- *Structural steel:*
 - *Deck: 36,000 tonnes*
 - *Pylons: 4,600 tonnes*
- *Stay cables: 1,500 tonnes*
- *Pier prestressing: 200 tonnes*

