

## LES HAUBANS DU PONT RION-ANTIRION APPROCHE ANTISISMIQUE

### THE RION-ANTIRION BRIDGE STAY CABLES A SEISMIC APPROACH

**Benoît LECINQ, Jean-Pierre MESSEIN**

**FREYSSINET**

**Laurent BOUTILLON**

**VINCI Construction**

#### 1. INTRODUCTION

Le pont Rion-Antirion, en Grèce, a été inauguré en août 2004. Ce pont traverse le golfe de Corinthe et relie le port transbordeur de Rion, sur le Péloponnèse, à Antirion sur le continent.

Il s'agit d'un pont haubané à plusieurs portées, de 2250 m de long sur 27 m de large, composé de trois portées principales de 560 m de long chacune. Le tablier supporte une autoroute à quatre voies et se compose de deux poutres longitudinales en acier espacées de 22 m, qui supportent des poutres de plancher transversales en acier et des panneaux préfabriqués en béton. Deux plans de haubans supportent le tablier, chaque plan se composant de 23 haubans. Le système de haubans Freyssinet est utilisé dans le cadre de ce projet car il satisfait aux exigences d'un projet aussi ambitieux, notamment pour sa facilité d'installation, sa durabilité et sa stabilité en présence de vibrations dues au vent.

Le pont Rion-Antirion est en outre situé dans une zone très exposée aux séismes : dans cette zone, les séismes peuvent être d'une magnitude supérieure à 7 sur l'échelle de Richter ; le pont traverse une faille tectonique active à l'endroit où le Péloponnèse est orienté Est par rapport au continent. De ce fait, le déplacement d'une pile par rapport aux autres peut atteindre 2 m pendant la durée de vie du pont. Ainsi, la conception générale du pont de Rion-Antirion d'une part, et la technologie de haubanage d'autre part, ont dû être adaptées spécialement pour répondre aux exigences antisismiques de la zone. Un déviateur antisismique novateur a été spécialement conçu pour ce projet.

#### 1. INTRODUCTION

*The Rion-Antirion bridge in Greece was inaugurated in August 2004. The bridge crosses the Gulf of Corinthe, and links the ferry port of Rion, on the Peloponnese, with Antirion on the mainland.*

*It is a multi-span cable-stayed bridge, 2 250 m long and 27 m wide, with three main spans, 560 m long each. The deck carries a four lane motorway and consists of two longitudinal steel girders, spaced 22 m apart, supporting transverse steel floor beams and precast concrete panels. Two planes of stays support the deck, each fan consisting of 23 stay cables. The Freyssinet stay cable system is used on this project, as it fully meets the requirements of such an ambitious project, notably ease of installation, durability and stability against wind induced vibrations.*

*In addition, the Rion-Antirion bridge is located in a very seismic area : earthquakes can be over Richter scale 7 in this area and the bridge crosses an active tectonic fault, where the Peloponnese is sliding East relative to the mainland. Hence, the displacement of any pier relative to the others can reach 2 meters over the lifetime of the bridge. Hence, not only the general design of the Rion-Antirion bridge but also the stay cable technology, had to be specially adapted to meet the seismic requirements of this area. An innovative para-seismic deviator was specially designed for this project.*

Enfin, les conditions de vent, qui peuvent être très sévères dans cet environnement maritime, combinées à la longueur des câbles, qui peut atteindre 293 m, exigeaient des mesures d'atténuation des vibrations dues au vent. Ces mesures consistent généralement en des amortisseurs, le profilage de la surface des câbles et, parfois, des câbles transversaux.

Cette combinaison d'une protection antisismique et d'amortisseurs contre les effets du vent constitue une conception nouvelle et originale qui a exigé des adaptations spéciales, du fait que le vent et les séismes peuvent donner lieu à des spécifications contradictoires.

## 2. SYSTÈME HD STANDARD DE FREYSSINET

Les haubans sélectionnés pour le pont Rion-Antirion sont des faisceaux de torons parallèles de sept fils comme c'est le cas sur la plupart des grands ponts construits depuis la fin des années quatre-vingt dans le monde. Le système HD de Freyssinet repose en outre sur l'indépendance totale de chaque toron et présente les caractéristiques suivantes :

- ancrage individuel ;
- protection individuelle contre la corrosion ;
- possibilité de montage, de mise en contrainte, de démontage et de remplacement individuel de chaque toron.

### 2.1 Longueur libre

La longueur libre du câble est constituée d'un faisceau de torons parallèles à sept fils placés à l'intérieur d'une gaine en polyéthylène haute densité (HDPE). Le toron correspond au monotoron Freyssinet protégé individuellement avec galvanisation, agent de remplissage protecteur et gaine en HDPE.

Pour le pont Rion-Antirion, les haubans se composent de 43, 55, 61 ou 75 torons de 15,7 mm de diamètre nominal et d'une résistance de 1770 MPa. L'épaisseur minimale du revêtement HDPE est de 1,5 mm.

Le faisceau de monotorons est contenu dans un tube hauban Freyssinet en HDPE coextrudé. Une double nervure hélicoïdale est en outre appliquée sur le tube hauban pour éviter les vibrations dues à la pluie et au vent (voir section 3.2 ci-dessous). Aucun agent de remplissage n'est injecté dans le tube hauban et le faisceau de torons n'est de ce fait pas hermétiquement confiné dans la longueur libre.

*Finally, the wind conditions that can be quite severe in this maritime environment, combined with the length of the cables that can reach 293 meters, required mitigation measures against wind vibration. These measures consist classically of dampers, cable surface profiling, and sometimes cross cables.*

*The combination of para-seismic protection and dampers against wind is a new original design that required special adaptations, as wind and seism can lead to opposite specifications.*

## 2. THE STANDARD FREYSSINET HD SYSTEM

*The stay cables selected for the Rion-Antirion bridge are bundles of parallel seven-wire strands like on most major bridges built since the late 1980's in the world. In addition, the Freyssinet HD system is based upon the total independence of each strand and offers the following features :*

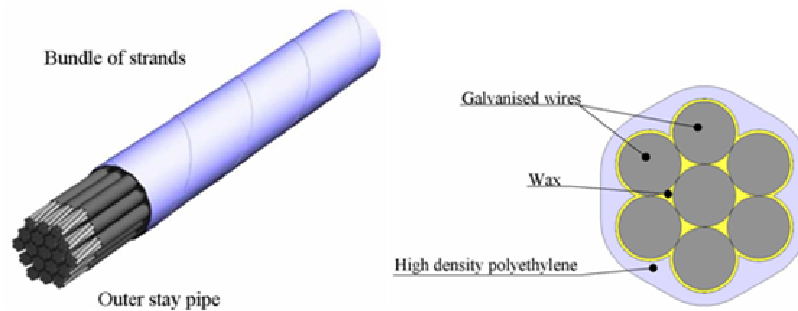
- *individual anchoring ;*
- *individual corrosion protection ;*
- *possibility of individual erection, stressing, dismantling and replacement of each strand.*

### 2.1 Free length

*The free length of the cable is formed of a bundle of parallel seven-wire strands placed inside a high density polyethylene (HDPE) duct. The strand is the individually protected Freyssinet monostrand with galvanisation, wax protective filler and HDPE sheath.*

*For the Rion-Antirion bridge, the stay cables consist of 43, 55, 61 or 75 strands, 15.7 mm nominal diameter and class 1770 MPa. The minimum thickness of the HDPE coating is 1.5 mm.*

*The bundle of monostrands is contained within a Freyssinet co-extruded HDPE stay pipe. Moreover, a double helical rib is laid on the stay pipe to prevent rain and wind induced vibrations (see section 3.2 below). No filler is injected inside the stay pipe and the bundle of strands is therefore not tightly confined in the free length.*



Bundle of strands / Faisceau de torons  
 Outer stay pipe / Tube hauban externe  
 Galvanised wires / Fils galvanisés  
 Wax / Cire  
 High density polyethylene / Polyéthylène haute densité

Fig. 1 : Longueur libre des haubans Freyssinet / free length of the Freyssinet stay cables

## 2.2 Ancrage

Deux ancrages spéciaux transfèrent la tension des haubans à la structure (tablier et pylône). Chaque toron est ancré individuellement dans un bloc d'ancrage en acier spécial associé à des cales à haute résistance à la fatigue capables de résister à des sollicitations en fatigue de plus de 200 MPa d'amplitude combinées à des déflexions angulaires pendant 2 millions de cycles.

- L'ancrage du tablier est passif et fixe (HDF). Il est placé dans un gousset en acier soudé à la nervure de la poutre principale. Ce gousset a été spécialement conçu pour satisfaire aux exigences de fatigue et antisismiques.
- L'ancrage du pylône est actif (extrémité sous contrainte) et peut être ajusté (HDR). Il repose directement sur une plaque d'appui et un « tube coffrage » intégré à la tête de pylône en composite (acier de construction et béton). Le réglage des haubans est réalisé au moyen d'un tube fileté et d'un écrou.

Dans les deux blocs d'ancrage, la distance transversale entre torons doit être suffisante pour permettre la mise en place des cales. De ce fait, les torons sont déviés entre le faisceau de longueur libre (là où les torons se touchent) et l'ancrage (là où la distance entre torons est supérieure à 10 mm). Dans les haubans Freyssinet standard, cette déviation est obtenue au moyen d'un « déviateur » placé à quelques mètres de l'ancrage.

## 2.2 Anchorage

Two special anchorages transfer the tension of the stay cables to the structure (deck and pylon). Each strand is individually anchored in a high-grade steel anchor block with high fatigue performance wedges resisting over 200 MPa fatigue stress amplitude combined with angular deflection during 2 millions cycles.

- The deck anchorage is passive and fixed (HDF). It is placed in a steel gusset welded to the main girder web. This gusset was specially designed to meet fatigue and seismic requirements.
- The pylon anchorage is active (stressing end) and can be adjusted (HDR). It is directly seating on a bearing plate and a "formwork tube" incorporated in the composite pylon head (structural steel and concrete). The stay adjustment is obtained from a threaded tube and a nut.

In both anchor blocks, the transverse distance between the strands needs to be sufficient to locate the wedges. Hence, the strands are deviated between the free length bundle (where strands touch one another) and the anchorage (where the distance between strands is over 10 mm). In standard Freyssinet stays, this deviation is obtained by a "deviator" placed a few meters away from the anchorage.

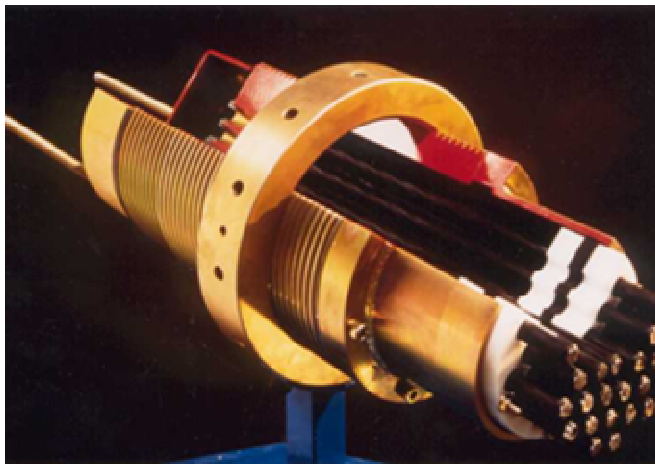


Fig. 2 : Vue de l'ancrage HDR réglable de Freyssinet / View of the Freyssinet HDR adjustable anchorage

### 3. CHARGES SISMQUES ET DUES AU VENT SUR LES CÂBLES DU PONT RION-ANTIRION

### 3. THE RION-ANTIRION SEISMIC AND WIND LOADS ON CABLES

#### 3.1 Charges sismiques sur les câbles

#### 3.1 Seismic loads on cables

Le pont Rion-Antirion est sans doute une des structures qui a nécessité les analyses sismiques les plus poussées jamais réalisées. Pour mémoire :

*The Rion-Antirion bridge is certainly one of the structures that has required the most elaborate seismic analyses ever performed. One may recall :*

- conception des piles et des fondations sous-marines avec une couche isolante de 90 m de diamètre en bas de chaque pylône et des inserts en acier dans le sol à 60 m en dessous du niveau de la mer ;
- conception du tablier continu avec isolement complet des culées et des pylônes nécessitant des connexions fusibles, des supports articulés et les plus gros amortisseurs hydrauliques jamais fabriqués ;
- conception des têtes de pylônes, capables de résister à des séismes tant pendant leur vie en service que pendant la construction.

- the design of the submarine piers and foundations with a 90 m diameter isolation layer at the bottom end of each pylon and steel inserts in the soil 60 m below sea level ;
- the design of the continuous deck with complete isolation from the abutments and pylons, requiring fuse connections, articulated supports and the largest hydraulic dampers ever built ;
- the design of the pylon heads, capable of resisting seisms both during service life and construction.

Les haubans ne pouvaient pas ne pas faire l'objet d'une conception antisismique. Une analyse historique de plusieurs câbles a été réalisée par le bureau d'études de Vinci Construction sous ANSYS : chaque hauban a été modélisé par éléments finis et masse répartie. Les histogrammes des accélérations représentant le séisme théorique ont été appliqués aux ancrages inférieur et supérieur. Les efforts et déplacements extrêmes des haubans ont été enregistrés.

*The stay cables could not be set aside in seismic design. A time-history analysis of several cables was carried out by Vinci Construction Design Office on ANSYS : each stay was modelled with finite elements and a distributed mass. Histograms of accelerations representing the design seism were applied to the bottom and top anchorage. The extreme forces and displacements of the stay cables were recorded.*

En cas de séisme, le déplacement des ancrages et la réponse dynamique des haubans produit des variations de tension axiale ainsi que des déflexions angulaires du câble à proximité de l'ancrage.

*In case of seism, anchorage displacement and dynamic response of the stays result in axial tension variations as well as angular deflections of the cable close to the anchorage. Therefore, a design criterion combining axial tension and bending forces was necessary.*

De ce fait, un critère de conception combinant la tension axiale et les efforts de flexion était nécessaire.

Le critère suivant a été adopté :

$$\sigma_T + \sigma_B < f_y \quad (1)$$

où

$\sigma_T$  est la contrainte normale résultant de la tension axiale ;

$\sigma_B$  est la contrainte normale résultant de la flexion ;

$f_y$  est la limite d'élasticité à 0,1 % du câble (1593 MPa pour 1770 torons).

Ce critère a été défini pour éviter la réduction de résistance à la fatigue susceptible de se produire en cas de déformation élastique du toron lors d'un séisme. Noter que la contrainte de flexion  $\sigma_B$  dans le toron varie selon que la déviation du câble est guidée sur un rayon de courbure donné ou que la flexion est libre. Ces deux situations sont calculées au moyen des équations suivantes [1].

Contrainte de flexion pour une déviation guidée, lorsque le toron est dévié par une selle :

$$\sigma_{B \text{ guidé}} = E \frac{r}{R} \quad (2)$$

Où :

E est le module d'élasticité du toron ;

r est le rayon de flexion approprié du toron ;

R est le rayon de courbure de la selle.

Contrainte de flexion en déviation libre, lorsque le toron dépasse d'un élément de guidage :

$$\sigma_{B \text{ libre}} = 2\omega \sqrt{\frac{EF}{S}} = 2\omega \sqrt{E\sigma_T} \quad (3)$$

où

$\omega$  est l'angle de déviation (en radians) ;

F est la tension axiale permanente dans le hauban ;

S est la section du hauban.

Bien que le système HD standard de Freyssinet soit doté d'un dispositif de filtration des flexions intégré à l'ancrage, il n'était pas capable de remplir le critère de courbure avec les charges sismiques du pont Rion-Antirion. De ce fait, un dispositif était nécessaire pour réduire la flexion des torons au moyen d'un déviateur antisismique (PSD).

### 3.2 Atténuation des vibrations

Les longueurs des haubans du pont Rion-Antirion sont comprises entre 77 et 293 m. Les haubans à haute résistance à la fatigue ayant un faible facteur d'amortissement interne, les câbles les plus longs sont plus sensibles aux vibrations dues au vent.

The following criterion was adopted :

$$\sigma_T + \sigma_B < f_y \quad (1)$$

where

$\sigma_T$  is the normal stress resulting from axial tension ;

$\sigma_B$  is the normal stress resulting from bending ;

$f_y$  is the 0.1% yield stress of the cable (1593 MPa for class 1770 strands).

This criteria was defined to prevent the reduction of fatigue resistance that could occur in case of plastic yielding of the strand during a seism. Note that the bending stress  $\sigma_B$  in the strand depends if the cable deviation is guided over a given curvature radius, or if the bending is free. These two situations are computed with following equations [1].

Bending stress for guided deviation, when the strand is deviated by a saddle :

$$\sigma_{B \text{ guidé}} = E \frac{r}{R} \quad (2)$$

Where:

E is the Young elastic modulus of the strand ;

r is the appropriate bending radius of the strand ;

R is the curvature radius of the saddle.

Bending stress for free deviation, when the strand extends out of a guiding element :

$$\sigma_{B \text{ libre}} = 2\omega \sqrt{\frac{EF}{S}} = 2\omega \sqrt{E\sigma_T} \quad (3)$$

where

$\omega$  is the deviation angle (in radians);

F is the permanent axial tension in the stay;

S is the cross section of the stay.

Although the standard Freyssinet HD system has a bending filtration device incorporated into the anchorage, it was not capable to meet the curvature criteria with the Rion-Antirion seismic loading. Hence, a device was required to reduce the bending of the strands with a para-seismic deviator (PSD).

### 3.2 Vibration mitigation

The Rion-Antirion stay cables lengths range from 77 to 293 meters. As high fatigue resistant stay cables have a low internal damping factor, the longer cables are more sensitive to wind vibrations.

De ce fait, une analyse complète des vibrations des haubans a été réalisée par le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment).

### Analyse des vibrations

Les principales sources de vibrations des haubans sont les suivantes :

- vibrations dues à la pluie et au vent, où des ruissellements d'eau le long du hauban modifient le profil circulaire du câble et créent une instabilité ;
- tremblement, c'est-à-dire l'action directe des bourrasques sur les câbles ;
- décollement de tourbillons, c'est-à-dire les forces d'oscillation résultant des tourbillons de Von Karman ;
- excitation paramétrique là où le déplacement de l'ancrage du tablier et du pylône excite le câble.

### Mesures d'atténuation

Des tubes haubans profilés comportant une double nervure hélicoïdale sont utilisés pour éviter les vibrations dues à la pluie et au vent. On sait en effet que cette mesure permet d'éviter la formation de ruissellements organisés le long des haubans.

Les câbles transversaux, également appelés aiguilles, permettent d'éviter efficacement l'excitation paramétrique en décalant les fréquences modales des haubans. Elles sont particulièrement nécessaires lorsque les fréquences des câbles viennent se superposer aux fréquences modales de l'ensemble du pont. Une analyse modale du pont a permis de conclure à la nécessité des aiguilles. De ce fait, des manchons spéciaux, prévus pour l'installation future d'aiguilles, seront installés.

Pour éviter les autres sources de vibrations, un amortissement minimal de 3 % (décroissement logarithmique) a été spécifié sur tous les haubans. De ce fait, afin d'accroître l'amortissement des haubans, des amortisseurs visqueux pourraient être utilisés.

## 4. CARACTÉRISTIQUES PARTICULIÈRES DES HAUBANS DU PONT RION-ANTIRION

Le problème suivant a dû être résolu pour les haubans du pont Rion-Antirion :

- proposer un déviateur antisismique pour réduire la flexion des torons en cas de séisme ;
- inclure des amortisseurs internes sur les haubans courts, d'une efficacité suffisante en dépit du déviateur antisismique ;
- éviter le chargement excessif du gousset en acier en cas de séisme.

*Therefore, a comprehensive analysis of stay cable vibration was carried out by CSTB (Scientific and Technical Centre for Construction).*

### Vibration analysis

*The main sources of stay cable vibrations were listed as follows :*

- *rain and wind induced vibrations, where water rivulets flowing along the stay alter the circular profile of the cable and create an instability ;*
- *buffeting, i.e. the direct action of gusty wind on the cables ;*
- *vortex shedding, i.e. the oscillating forces arising from Von Karman vortices ;*
- *parametric excitation where deck and pylon anchorage displacement excite the cable.*

### Mitigation measures

*Profiled stay pipes, with a double helical rib, are used to prevent rain and wind induced vibration. Indeed this is known to prevent the formation of organised water rivulets along the stays.*

*The cross-tie cables, also called "aiguilles" are efficient to prevent parametric excitation by offsetting the stay cable modal frequencies. They are especially needed when cable frequencies overlap with the modal frequencies of the whole bridge. From a modal analysis of the bridge, it was concluded that cross-ties could be necessary. Hence, special sleeves allowing future installation of a*

*To prevent other sources of vibration, a minimum damping of 3 % (logarithmic decrement) was specified on all the stays. Hence, in order to increase the damping of the stays, viscous dampers could be used.*

## 4. SPECIAL FEATURES OF THE RION-ANTIRION STAY CABLES

*The following problem had to be solved for the Rion-Antirion stay cables :*

- *propose a para-seismic deviator, to reduce the bending of strands in case of seism ;*
- *include internal dampers on the short stays, with sufficient efficiency, despite the paraseismic deviator ;*
- *prevent excessive loading of the steel gusset in case of seism.*

#### 4.1 Limitation de courbure en cas de séisme

Les résultats de l'analyse historique ont été tracés sur la courbe ci-dessous par rapport au critère de contrainte axiale + flexion ci-dessus. On voit que sans déviateur, le critère est largement dépassé.

On remarque deux situations extrêmes :

- tension axiale très élevée pour une déflexion angulaire limitée ;
- tension axiale modérée pour une déflexion angulaire extrême. Par exemple, l'angle le plus grand est de l'ordre de 170 milliradians. Sans mesures d'atténuation, cet angle produit une contrainte de flexion  $\sigma_B$  libre et le critère est dépassé.

#### 4.1 Curvature limitation in case of seism

In the graph below, the results of the time-history analysis have been plotted against the above axial + flexural stress criterion. It can be seen that without deviator, the criteria is greatly exceeded.

Two kinds of extreme situations can be noted :

- very high axial tension with limited angular deflection ;
- moderate axial tension with extreme angular deflection. E.g., the highest angle is in the order of 170 milliradians. Without any mitigation, this angle results in a high bending stress  $\sigma_B$  free and the criterion is exceeded.

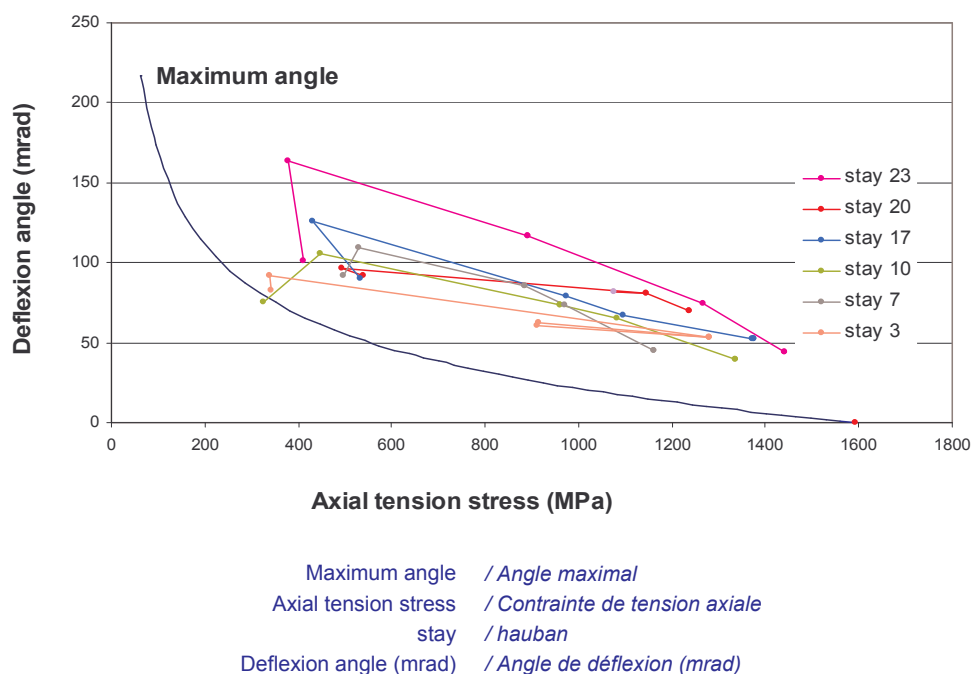


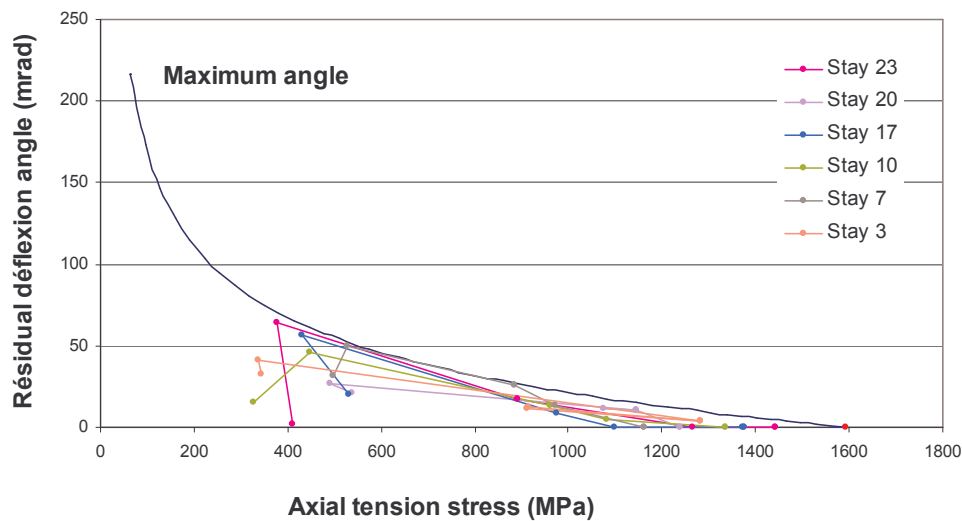
Fig. 3 : Situations sismiques extrêmes dans les haubans sans déviateur antisismique  
Extreme seismic situations in stays without para-seismic deviator

Le dispositif proposé, appelé déviateur antisismique (PSD), est en forme de diabol et capable de guider la plupart des déviations du câble, tant au niveau de l'ancrage inférieur qu'à celui de l'ancrage supérieur, avec un rayon de courbure contrôlé, sur un angle de 100 milliradians.

La deuxième courbe ci-dessous illustre l'efficacité des déviateurs antisismiques : le déviateur guide la déflexion du câble sur un angle suffisant pour que les contraintes de flexion résiduelles remplissent le critère.

The proposed device, called para-seismic deviator (PSD), has a diabolo shape, capable of guiding most of the cable deviation, both at the bottom and top anchorage, with a controlled curvature radius, over an angle of 100 milliradians.

The second graph below illustrates the efficiency of the para-seismic deviators : the deviator guides the deflection of the cable over a sufficient angle so that the remaining bending stresses meet the criterion.



Maximum angle / Angle maximal  
 Residual deflexion angle (mrad) / Angle de déflexion résiduel (mrad)  
 Axial tension stress / Contrainte de tension axiale  
 Stay / Hauban

Situations sismiques extrêmes dans les haubans avec déviateur antisismique  
*Extreme seismic situations in stays with para-seismic deviator*

On voit que la forme en diabolo est efficace pour remplir le critère de contrainte axiale + flexion. Le PSD doit toutefois être compatible avec les autres fonctions du système de haubans :

- durabilité et remplaçabilité ;
- dimensions de la structure en acier et fonctionnement correct de l'IHD ;
- chargement transversal limite sur le gousset en cas de séisme.

*It can be seen that the diabolo shape is efficient to meet the axial + flexural stress criterion. However the PSD has to be compatible with the other functions of the stay cable system :*

- *durability and replaceability ;*
- *dimensions of the steel structure and proper functioning of the IHD ;*
- *limit transverse loading on the gusset in case of seism.*

## 4.2 Fonctions supplémentaires du PSD

La Figure 4 donne une idée de l'implantation du PSD. Les différentes fonctions sont expliquées dans ce qui suit :

## 4.2 Additional functions of the PSD

*Fig.4 gives an idea of the PSD lay-out. The different functions are explained in the following :*

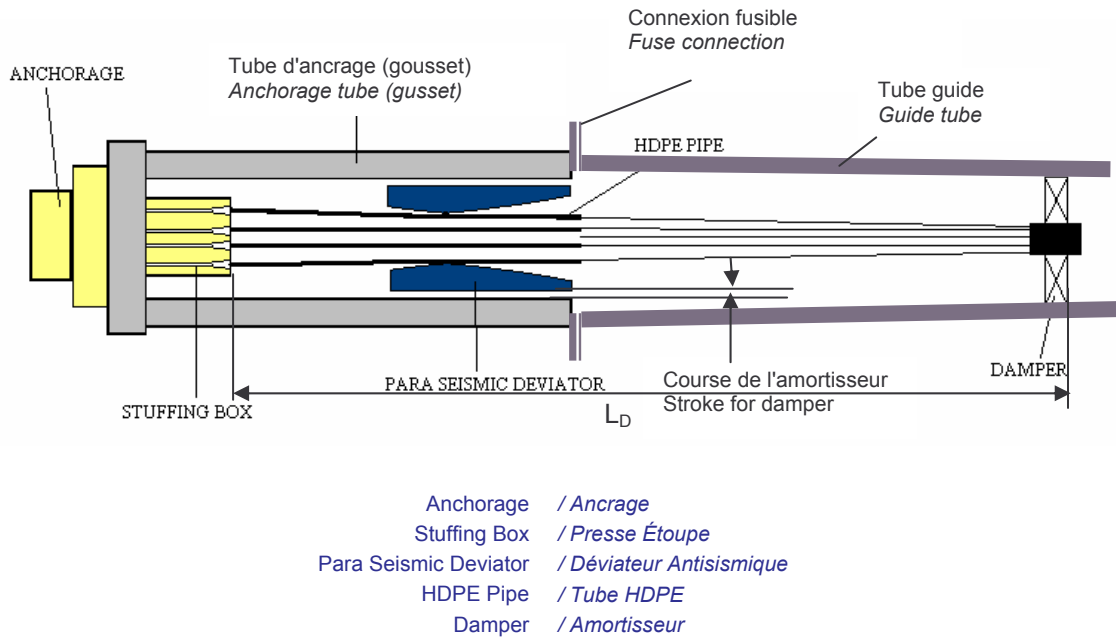


Fig. 4 : Implantation du déviateur antisismique inférieur  
Lay-out of bottom para-seismic deviator

### Durabilité et remplaçabilité

Les PSD ont été conçus comme des composants autonomes, montés autour du faisceau de torons avant l'installation du câble. Ils sont moulés dans une résine spéciale et renforcés par un tube en acier. Le matériau a été sélectionné pour sa résistance mécanique (dureté, contrainte de cisaillement et de traction) afin qu'il puisse résister aux très forts efforts transversaux associés à un séisme (plus de 1000 kN), et pour sa durabilité dans un environnement marin agressif (plus de 50 ans).

La protection des torons contre la corrosion étant continue dans le PSD, la durabilité des haubans n'est pas modifiée par ce dernier. Après un séisme, le PSD peut être inspecté et remplacé facilement si nécessaire.

### Chargement transversal limite sur le gousset en cas de séisme

Comme le montre la Figure 5, le gousset en acier conçu pour le pont Rion-Antirion ne comporte pas de renforcement transversal. Cette conception flexible a été rendue nécessaire par la capacité transversale du tablier (conception de la capacité). Mais cette conception limite également la résistance du gousset aux charges transversales appliquées par les haubans. Le gousset ne pourrait en aucun cas accepter un effort sismique transversal extrême se produisant avec un bras de levier  $L_D$ .

### Durability and replaceability

The PSD have been designed as stand alone components, that are placed around the strand bundle before cable installation. They are moulded in a special resin, with a steel tube reinforcement. The material was selected for its mechanical resistance (hardness, shear and traction stress) in order to resist the very strong transverse forces arising in case of seism (over 1000 kN) and its durability in an aggressive marine environment (over 50 years).

As the strand corrosion protection is continuous through the PSD, the durability of the stays is not modified by the PSD. After a seism, the PSD could be easily visited and replaced if necessary.

### Limit transverse loading on the gusset in case of seism

As shown by fig.5, the steel gusset designed on Rion-Antirion has no transverse stiffening. This flexible design was required by the transverse capacity of the deck (capacity design). But this design also limits the gusset resistance to transverse loading by the stay cables. The gusset could, by no mean, accept an extreme transverse seismic force arising with a lever arm  $L_D$ .



Fig. 5 : Vue CAO d'un gousset en acier / CAD view of a steel gusset

Il a de ce fait fallu concevoir une connexion fusible entre le gousset et le tube de guidage. Cette connexion est réalisée au moyen de boulons spéciaux d'un diamètre soigneusement choisi pour s'adapter à la spécification d'une console :

- en service, la connexion précontrainte ne doit pas permettre l'ouverture d'un joint quelconque sous 2 % d'effort transversal afin d'éviter toute fatigue dans la connexion ;
- en cas de séisme, le fusible doit casser avant 6% d'effort transversal afin de limiter le moment de flexion sur le gousset.

#### 4.3 Essais de qualification

La conception du déviateur antisismique a été réalisée par le Département technique de Freyssinet International. Après acceptation du concept par un contrôleur indépendant, deux essais ont été réalisés en laboratoire pour qualifier les dispositifs spéciaux nécessaires pour les câbles du pont Rion-Antirion :

- la connexion fusible a été testée par des essais en vraie grandeur ;
- la résistance du PSD aux charges transversales et la capacité à confiner correctement le faisceau de torons ont été testées à la presse sur maquette de section.

### 5. CONCLUSION

La conception novatrice des haubans du pont Rion-Antirion, avec déviateur antisismique et amortisseurs internes raccordés par connexion fusible, a permis de concilier toutes les qualités des haubans standard de Freyssinet avec les exigences sismiques et de résistance au vent particulières du projet Rion-Antirion.

L'utilisation de la technologie éprouvée des haubans HD de Freyssinet permettra de garantir une excellente durabilité (performances en fatigue et protection contre la corrosion) et la maîtrise du calendrier d'installation. Ces conditions sont essentielles dans le cas d'un mégaprojet comme Rion-Antirion, où le cycle d'installation du tablier est la dernière tâche critique avant la réalisation complète du pont.

*Hence, it was necessary to design a fuse connection between the gusset and the guide tube. This connection is obtained from special bolts with a finely chosen diameter to fit into a bracket specification :*

- *under service condition, the prestressed connection shall not allow any joint opening under 2% of transverse force, to avoid fatigue in the connection ;*
- *under seismic condition, the fuse shall break before 6% of transverse force, to limit the bending moment on the gusset.*

#### 4.3 Qualification tests

*The design of the para-seismic deviator has been carried out by Freyssinet International Technical Department. After the concept was accepted by the independent checker, two tests have been carried out in laboratory to qualify the special devices necessary for the Rion-Antirion stay cables :*

- *the fuse connection was tested by real size tests ;*
- *the resistance of the PSD to transverse loads and to confine properly the strand bundle was tested with a press on a section mock-up.*

### 5. CONCLUSION

*The innovative design of the Rion-Antirion stay cables, with a para-seismic deviator and internal dampers connected by a fuse connection has conciliated all the qualities of the standard Freyssinet stay cables, with the unique seismic and wind requirements of the Rion-Antirion project.*

*Using the well proven technology of Freyssinet HD stays will guaranty excellent durability (fatigue performance or corrosion protection) and controlled installation schedule. This is key for a mega project like Rion-Antirion where the deck installation cycle is the last critical task before bridge completion.*

Tous les dispositifs de protection supplémentaire nécessaires pour éviter les vibrations dues au vent et tenir des charges sismiques extrêmes ont été conçus avec pour objectif de réduire les risques au minimum. Les éléments ont été qualifiés par des essais en vraie grandeur. Une attention particulière a été portée à la facilité d'installation lors de la conception du PSD. Le projet Rion-Antirion a démontré que le système de haubans HD de Freyssinet était suffisamment flexible pour satisfaire aux exigences particulières de tout projet sans compromettre ses caractéristiques fondamentales et ses avantages.

## 6. RÉFÉRENCES

[1] SETRA-CIP Recommendations on Stay Cables Design and Testing (Juin 2002) (recommandations relatives à la conception et aux essais de haubans).

## 7. INTERVENANTS

Concessionnaire : Gefyra SA

Constructeur : Kinopraxia Gefyra (Vinci Construction Grands Projets : pilote à 53%)

Etudes : Vinci Construction Grands Projets - Ingérop (Paris) - Géodynamique & Structures (Paris) - Domi (Athènes)

Etudes du wet dock : Doris (Paris)

Instrumentation : Advitam (groupe Vinci)

Fournisseurs et prestataires principaux :

- Haubans : Freyssinet
- Charpente métallique : Cleveland (UK), Metka (Grèce)
- Précontrainte : GTM (groupe Vinci)
- Etanchéité et chaussée : Eurovia (groupe Vinci)
- Equipements électriques et électroniques : Vinci Energies

Contrôle des études :

Buckland & Taylor (Vancouver – Canada) avec l'aide des spécialistes suivants : Docteur R. Peck, Professeur R. Dobry (Rensselaer Polytechnic Institute – New York), Professeurs N. Priestley et F. Seible (Université de San Diego), Professeur M. Calvi (Université de Pavie)

Supervision des travaux : Faber Maunsell (Londres)

Architecte : Berdj Mikaelian (Paris)

*All the additional protection devices necessary to prevent wind vibration and to accommodate extreme seismic loads were designed to minimise risks: the elements have been qualified by real-size tests. A great care has been laid on the ease of installation when designing the PSD. The Rion-Antirion project has proven that the Freyssinet HD stay cable system was flexible enough to meet the special requirements of any project without altering its fundamental characteristics and advantages.*

## 6. REFERENCES

*[1] SETRA-CIP Recommendations on Stay Cables Design and Testing (June 2002).*

## 7. PARTICIPANTS

Owner: Gefyra SA

Main contractor: Kinopraxia Gefyra (Vinci Construction Grands Projets: leader at 53%)

Design: Vinci Construction Grands Projets - Ingérop (Paris) - Géodynamique & Structures (Paris) - Domi (Athens)

Wet dock design: Doris (Paris)

Monitoring: Advitam (Vinci group)

Main suppliers and subcontractors:

- Stay cables: Freyssinet
- Steel structure: Cleveland (UK), Metka (Greece)
- Prestressing: GTM (Vinci group)
- Watertightness and road pavement: Eurovia (Vinci group)
- Electric and electronic equipment: Vinci Energies

Design Supervision:

*Buckland & Taylor (Vancouver – Canada) with the help of the following specialists: Doctor R. Peck, Professor R. Dobry (Rensselaer Polytechnic Institute – New York), Professors N. Priestley et F. Seible (San Diego University), Professeur M. Calvi (Pavie University)*

Engineer: Faber Maunsell (London)

Architect: Berdj Mikaelian (Paris)