

Haute surveillance et évaluation de l'aptitude au service du pont suspendu d'Aquitaine

Thierry KRETZ *
Pierre BREVET
Christian CRÉMONA
Bruno GODART

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Pierre PAILLUSSEAU

Centre d'études techniques de l'Équipement du Sud-Ouest

RÉSUMÉ

Les câbles porteurs du pont d'Aquitaine, mis en service en 1967, sont constitués de torons de type câbles clos, dont les fils élémentaires ne sont pas galvanisés. La protection contre les infiltrations est assurée par un revêtement en produit bitumineux. Malgré sa rénovation en 1985, cette protection s'est avérée insuffisante. En 1998, une auscultation spécifique a montré que la corrosion des fils atteignait un stade critique. La démarche adoptée pour apprécier l'aptitude au service de l'ouvrage et surveiller l'évolution de la corrosion des câbles porteurs est présentée. La méthode utilisée pour déterminer la résistance résiduelle du câble et évaluer sa tension maximale en service est décrite. Les principes d'une approche probabiliste sont développés. L'analyse des risques est détaillée, puis la métrologie mise en place pour mettre l'ouvrage sous « haute surveillance ». Enfin, les résultats de cette surveillance sont présentés et analysés. L'apparition de pathologies aussi graves sur un ouvrage relativement récent est une incitation à améliorer encore la durabilité des ouvrages et à développer les technologies d'entretien préventif.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

ABSTRACT

CLOSE MONITORING AND SERVICE CAPACITY EVALUATION OF THE AQUITAINE SUSPENSION BRIDGE

The suspension cables on the Aquitaine Bridge, in service since 1967, are composed of locking cable-type strands, with non-galvanized elementary wires. Protection against infiltration has been offered by means of a bituminous-component lining. Despite a renovation project completed in 1985, this protection has proven inadequate. In 1998, a special examination revealed that wire corrosion had reached a critical stage. The approach adopted for assessing service capacity of the structure and for monitoring the evolution of bearing cable corrosion will be presented herein. The method employed to determine the cable's residual strength and evaluate its maximum tension during service will also be described and the principles behind a probabilistic strategy laid out in detail. The discussion will include a risk analysis and the metrology introduced to place the structure under "close surveillance". Lastly, results from this monitoring effort will be provided and analyzed. The appearance of pathologies this serious on a relatively recent structure serves as an incentive to further improve structural durability and develop preventive maintenance technologies.

FIELD: Structural engineering.

LE PONT D'AQUITAINE

Description générale

Le pont d'Aquitaine (Fig. 1) mis en service en 1967 est, par ordre d'importance, le deuxième pont suspendu après celui de Tancarville. Il permet à la circulation de transit de contourner l'agglomération de Bordeaux et au trafic provenant de l'autoroute A10 de pénétrer dans la ville. Le choix du type de pont a été imposé par le site et par les conditions nécessaires à la navigation maritime (tirant d'air

* Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 58, boulevard Lefebvre, 75732 Paris cedex 15, e-mail : thierry.kretz@lcpc.fr

□ **Figure 1**
Vue générale du pont d'Aquitaine
en cours de travaux.



minimal de 57 m au-dessus de l'étiage). À cet endroit, la Garonne a une largeur de 500 m et coule entre les coteaux calcaires de la rive droite, qui ont une altitude de 50 à 60 m, et la plaine de la rive gauche. En rive gauche, le terrain est constitué par 8 à 10 m de vase en surface, puis par 8 à 10 m de sables et graviers limoneux sur des marnes assez hétérogènes. Ce mauvais terrain a nécessité une étude soignée des fondations. On trouvera une description très complète de l'ouvrage et de son histoire, mais aussi du déroulement des travaux de remplacement de la suspension, dans [1].

L'avant-projet d'ensemble a été dressé par M. Merot et M. Prunier du Service central d'études techniques (prédécesseur du SETRA), sous la direction de M. Robinson qui dirigeait alors ce service. Il a été conçu à la suite du pont de Tancarville, avec une partie suspendue tout à fait classique. La travée centrale du pont suspendu de Bordeaux a une longueur de 393,75 m, alors que celle de Tancarville atteint 608 m, mais comme on accède à la rive gauche par un viaduc long d'environ 1 000 m, l'ensemble de l'ouvrage est plus long que celui de Tancarville : 1 767 m au lieu de 1 420 m.

Le pont d'Aquitaine possède un schéma statique simple : il comporte en effet trois travées indépendantes, symétriques, de portées respectivement égales à :

- 150 m pour les travées de rive qui reposent sur des appuis simples à leurs extrémités ;
- 393,75 m pour la travée centrale qui repose aussi sur des appuis simples.

Les pylônes en béton armé ont une hauteur de 103 m ; ce sont des pylônes encastrés et souples suivant le sens longitudinal ; ils présentent ainsi un aspect particulièrement léger. Le tablier a une largeur de 20 m, comprenant une chaussée de 14 m, deux pistes cyclables de 1,50 m et deux trottoirs de 1,10 m. Les tabliers ont été calculés pour pouvoir élargir la chaussée à 17 m en supprimant les pistes cyclables.

Description de l'ossature métallique du tablier

Le tablier s'apparente à un tube de section rectangulaire, dont la partie supérieure est constituée par la dalle de couverture et dont les trois autres parois sont triangulées : les deux poutres de rigidité latérales et le contreventement inférieur en croix de Saint-André. Cette forme tubulaire donne au tablier une très grande rigidité à la torsion, ce qui confère à l'ouvrage une bonne stabilité vis-à-vis de l'action du vent d'une part, et une bonne résistance sous l'action des surcharges excentrées d'autre part.

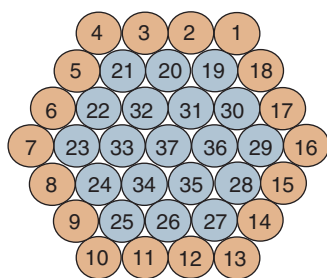
La résistance à la flexion du tablier est essentiellement due à ses deux poutres de rigidité latérales, de grande hauteur (4,83 m). Le système de triangulation adopté est le système Warren simple, à montants disposés au droit de chaque suspente, c'est-à-dire de chaque nœud inférieur des poutres de rigidité. La distance entre ces poutres est de 20,9 m, et celle des ensembles suspentes-montants est de 9,95 m. Les deux poutres sont reliées par des pièces de pont à âme pleine épaisse de 12 mm, de 1,80 m de hauteur, et disposées au droit des montants. Les pièces de pont supportent dix longerons, également à âme pleine épaisse de 8 mm, de 0,80 m de hauteur, et espacés de 2 m. La poutraison croisée ainsi constituée est recouverte par une dalle mixte, constituée d'une dalle en béton armé de 9 cm d'épaisseur coulée et connectée à une tôle inférieure continue de 8 mm d'épaisseur. Les membrures et diagonales des poutres de rigidité sont en acier rivé.

Description de la suspension

Chacun des deux câbles porteurs est constitué par 37 torons élémentaires parallèles de 217 fils, et comporte donc 8 029 fils (Fig. 2). Chaque toron élémentaire est un câble clos de diamètre 72 mm. Il est constitué par un faisceau de 127 fils tréfilés ronds, de 4,1 mm de diamètre, enroulés en hélice en couches concentriques de 1 + 6 + 12 + 18 + etc. fils, et par deux couches concentriques extérieures de 90 fils tréfilés de 4,5 mm d'épaisseur en forme de Z de façon que ces fils s'emboîtent étroitement les uns dans les autres. La surface extérieure de chaque câble est ainsi parfaitement lisse et se veut être fermée pour empêcher l'eau d'y pénétrer. La protection des câbles porteurs est complétée par un revêtement en produit bitumineux. Les câbles clos du pont de Bordeaux sont donc différents des câbles de Tancarville qui étaient constitués de torons classiques non galvanisés et non clos. À Bordeaux aussi, les concepteurs de la suspension n'avaient pas jugé utile de protéger les fils par galvanisation comme on le faisait depuis déjà longtemps aux États-Unis. Les arguments avancés à l'époque étaient le prix du revêtement de zinc et la réduction sensible de la résistance de l'acier provoquée par la galvanisation.

Les câbles porteurs du pont de Bordeaux ont une longueur, entre ancrages, voisine de 763 m. Leur flèche, en travée centrale, vaut le neuvième de la portée, soit $393,75/9 = 43,75$ m. Après leur passage au travers de la selle d'épanouissement, chaque toron élémentaire est ancré par l'intermédiaire de trois tiges d'ancrage de diamètre 76 mm. La résistance à la rupture de chaque toron élémentaire mesurée lors de la construction était comprise entre 4 500 et 4 800 kN, ce qui donne pour le câble complet une résistance de 166 500 kN. Compte tenu d'une tension maximale sous charge égale à 62 500 kN, le coefficient de sécurité est de 2,65 (3,5 à vide). Chaque suspente est constituée par deux câbles toronnés à double brin de 56 mm de diamètre. Ces câbles sont constitués de 139 fils ronds de 4,1 mm de diamètre. Chaque câble a une charge à la rupture égale à 4 590 kN (soit un coefficient de sécurité de 5,2).

Parmi les diverses actions d'entretien ou de réparation qui se sont déroulées depuis la mise en service, la seule intervention liée à la suspension est la réfection de sa protection anticorrosion réalisée, respectivement en 1984 et en 1986, pour les parties amont et aval, ainsi que le réglage de la tension des suspentes en 1986.



□ **Figure 2**
Coupe type du câble avec le numéro des torons.

SURVEILLANCE ET CONSTATATIONS EFFECTUÉES

Historique des inspections détaillées

En 1979, une inspection détaillée permet de découvrir quatorze ruptures de fils ; ces ruptures sont visibles à travers la fissuration de la couche de protection des fils qui résulte de la dé-tension localisée d'un fil cassé de la couche périphérique ; elles ne sont visibles que sur les 18 torons extérieurs du câble. Cette inspection est complétée par une auscultation électromagnétique des câbles dans les zones d'épanouissement situées à l'intérieur des chambres d'ancrage, zones où les torons sont accessibles individuellement ; cette auscultation ne met pas en évidence de problème notable. Il convient de noter que l'auscultation électromagnétique, qui consiste à déplacer une bobine électromagnétique qui entoure complètement le câble élémentaire pour détecter de la corrosion ou des ruptures de fils, est applicable sur des torons ou des câbles de faible diamètre, mais pas sur des faisceaux de torons jointifs tels que ceux utilisés sur les ponts de Tancarville ou de Bordeaux.

En 1983, une nouvelle inspection détaillée opérée sur la suspension seule permet de constater 39 ruptures de fils côté amont et 29 côté aval.

En 1993, soit environ sept ans après la réfection de la protection anticorrosion, une inspection détaillée montre un peu d'enrouillement à l'intérieur des selles d'épanouissement et, surtout, la rupture de 178 fils majoritairement situés près des colliers d'attache, et qui se répartissent de la façon suivante [2] :

- 82 sur le quart de suspension amont rive droite, près de sept colliers ;
- 67 sur le quart de suspension amont rive gauche, près de six colliers ;
- 23 sur le quart de suspension aval rive droite, près de six colliers ;
- 6 sur le quart de suspension aval rive gauche, près de trois colliers.

Comparé au nombre total de fils, le nombre de fils rompus représente donc alors 1 %, ce qui n'était pas alarmant du point de vue de la sécurité présentée par la structure.

Lancement de l'auscultation

À la suite de la rupture d'un toron d'un câble du pont de Tancarville en 1995, légèrement plus ancien et d'une conception voisine, le gestionnaire de l'ouvrage (la Direction départementale de l'Équipement de la Gironde) estime que l'ouvrage doit être considéré comme étant dans un état douteux et faire l'objet d'une surveillance renforcée, au sens du fascicule 03 de l'instruction technique IT79 [3].

Il demande donc au LCPC de mettre en œuvre un dispositif de surveillance acoustique sur le quart de suspension amont rive droite, le quart le plus dégradé. De 1995 à 1998, ce dispositif montre une évolution significative du nombre de ruptures.

En février 1998, une inspection détaillée du LRPC de Bordeaux permet de constater :

- 50 ruptures supplémentaires sur le quart de suspension amont rive droite, dont 35 pour le seul collier n° 8 ;
- 44 ruptures supplémentaires sur le quart de suspension amont rive gauche ;
- 1 rupture supplémentaire sur le quart de suspension aval rive droite ;
- 23 ruptures supplémentaires sur le quart de suspension aval rive gauche.

Le nombre de fils visiblement rompus représente à présent 2 % et la situation commence à devenir préoccupante. Pour mieux connaître l'état du câble, il est décidé d'ouvrir cinq colliers durant l'été 1998. L'examen visuel montre un très mauvais état du câble sous l'un des colliers : sur les dix-huit torons visibles, deux sont très dégradés, dans la mesure où le tiers de leurs fils Z périphériques sont rompus ainsi qu'un nombre significatif des fils des deux premières couches internes (14). Enfin, l'examen des câbles montre que les zones de rupture atteignent assez vite la troisième couche (couche extérieure de fils ronds), alors qu'en l'absence de couches périphériques de fils Z, elles n'atteignent que nettement plus tard les couches internes. Cela s'explique par la rétention d'eau derrière les couches de fils Z.

Ces constatations conduisent à classer l'ouvrage comme « défectueux » au sens du fascicule 03 de l'instruction technique IT79. La Direction départementale de l'Équipement décide donc de placer l'ouvrage sous haute surveillance. Parallèlement, la Direction des routes institue un comité technique, présidé par MM. les IGOA (Inspecteurs généraux ouvrages d'art) Claude Bois et Philippe Léger, chargés d'approfondir le diagnostic et de proposer les mesures à prendre.

Rappel sur les notions d'ouvrage douteux ou défectueux

Le fascicule 03 de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art définit la notion d'ouvrage douteux et défectueux et donne la méthodologie à suivre lorsque l'on craint une défaillance à court terme. L'état d'un ouvrage est qualifié de douteux lorsque l'analyse effectuée à la suite d'une action de surveillance ne permet pas de conclure sur la sécurité et la pérennité de l'ouvrage. L'état d'un ouvrage est qualifié de défectueux lorsque des désordres majeurs ont été mis en évidence, que leur gravité a pu être appréciée au moins sommairement, et que ces désordres sont susceptibles, soit tels quels, soit après évolution, de mettre en cause la sécurité ou la pérennité de l'ouvrage.

Un ouvrage dans un état douteux ou défectueux doit faire l'objet d'une auscultation. L'auscultation est un ensemble d'examen et de mesures spécifiques faisant le plus souvent appel à des techniques

élaborées, destinée à approfondir la connaissance réelle d'un ouvrage, à partir des résultats d'une inspection détaillée. Elle nécessite l'intervention d'une équipe compétente et, le plus souvent, l'utilisation de moyens spécialisés ou de techniques de laboratoires.

Pour un ouvrage douteux, les examens spécifiques et les études spécifiques doivent permettre de lever le doute, c'est-à-dire de classer l'ouvrage dans un état quasi normal ou dans un état défectueux.

Pour un ouvrage défectueux, les examens spécifiques et les études doivent permettre de se prononcer sur :

- l'évaluation de la résistance résiduelle et de l'aptitude au service ;
- l'analyse des phénomènes susceptibles de se produire ;
- la définition des grandeurs physiques mesurables permettant de caractériser une situation dangereuse, afin de permettre la mise sous haute surveillance.

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE RÉSIDUELLE ET DE L'APTITUDE AU SERVICE

Dans le cas présent, l'aptitude au service de l'ouvrage résulte directement de la sécurité des câbles porteurs. Il s'agit de déterminer la marge existant entre la résistance ultime du câble et la tension due aux charges permanentes et aux charges d'exploitation.

Expertise de l'état du câble

L'expertise en laboratoire des fils Z rompus, réalisée en 1998, met en évidence de la corrosion fissurante sous contrainte. Les amorces des ruptures sont en relation avec les contacts entre fils et entre fil et collier, mais les faciès de rupture ne sont pas des faciès de fatigue. Il semble que les contacts aient favorisé la corrosion locale et la formation de fissures à partir des piquûres de surface.

Les essais de corrosion sous contrainte et de fragilisation par l'hydrogène, qui avaient été antérieurement effectués (entre 1974 et 1978), avaient montré que les aciers n'étaient pas particulièrement sensibles à la corrosion sous contrainte pour le niveau des efforts appliqués sur les fils constitutifs des torons en cours d'exploitation. De même, les analyses chimiques des aciers effectuées en 1974 puis en 1998 (Tableau 1) ne révélaient pas de teneurs en éléments d'addition, ou résiduels, défavorables à leur résistance à la corrosion sous contrainte.

La contradiction apparente entre des fissures attribuées à un phénomène de corrosion fissurante, et le bon comportement aux essais de corrosion fissurante réalisés en 1974-1978, n'est cependant pas surprenante. En effet, il semble que soit la fatigue par frottement inter-filaire soit la corrosion par piquûre puisse être à l'origine de microfissures qui évoluent ensuite par corrosion fissurante jusqu'à la rupture. Cette constatation, déjà faite sur certains câbles de précontrainte, rejoint l'expérience japonaise [4]. Les différents mécanismes se conjuguent : corrosion, corrosion fissurante et fatigue par frottement. Or, les essais conventionnels de corrosion fissurante ne rendent pas compte de cette interaction. De plus, les essais de traction réalisés sur quelques prélèvements montrent que les fils corrodés ont un palier plastique très court, voire inexistant. La perte du palier plastique sur des aciers partiellement corrodés a également été mise en évidence sur les fils du pont de Tancarville [5].

TABLEAU I
Résultats des analyses chimiques des aciers constitutifs de fils Z prélevés en 1998

| Fils | C | Mn | Cr | Mo | Ni | Cu | V | Ceq | P | Si | S |
|--------|------|------|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|------|-------|
| 9-1-1 | 0,85 | 0,54 | 0,009 | 0,005 | 0,046 | 0,03 | 0 | 0,943 | 0,018 | 0,22 | 0,015 |
| 9-1-2 | 0,81 | 0,54 | 0,009 | 0,006 | 0,051 | 0,049 | 0 | 0,909 | 0,025 | 0,21 | 0,019 |
| 9-1-3 | 0,81 | 0,56 | 0,010 | 0,007 | 0,051 | 0,046 | 0 | 0,912 | 0,023 | 0,22 | 0,018 |
| 9-3-1 | 0,78 | 0,55 | 0,009 | 0,007 | 0,055 | 0,049 | 0 | 0,880 | 0,029 | 0,23 | 0,018 |
| 9-3-2 | 0,79 | 0,58 | 0,011 | 0,001 | 0,047 | 0,027 | 0 | 0,898 | 0,016 | 0,26 | 0,015 |
| 9-3-3 | 0,81 | 0,54 | 0,019 | 0,004 | 0,057 | 0,049 | 0 | 0,910 | 0,018 | 0,20 | 0,009 |
| 10-1-1 | 0,84 | 0,60 | 0,009 | 0,005 | 0,052 | 0,041 | 0 | 0,953 | 0,018 | 0,24 | 0,017 |
| 10-1-2 | 0,84 | 0,56 | 0,007 | 0,005 | 0,045 | 0,040 | 0 | 0,938 | 0,014 | 0,20 | 0,016 |
| 10-1-3 | 0,80 | 0,53 | 0,005 | 0,004 | 0,048 | 0,038 | 0 | 0,894 | 0,015 | 0,18 | 0,015 |

Ces résultats ont été confirmés ultérieurement sur le pont d'Aquitaine par l'expertise des fils après dépose et remplacement du câble. Cette expertise, menée en 2004, a permis d'apporter des informations utiles pour l'expertise de ce type de pathologie. Ainsi, après dépose de la suspension, au cours de laquelle la présence de fils rompus a été notée au niveau de nombreux colliers, le faisceau de 37 torons a été ouvert pour permettre cette expertise avec prélèvement de fils, au droit du collier n° 8 (zone présentant le plus de fils rompus en 1998), au droit d'une selle en haut de pylône et au droit d'une sellette de déviation à l'entrée d'une chambre d'ancrage.

Sur ces trois prélèvements, les endommagements les plus importants étaient localisés sous le collier 8. Outre les deux torons extérieurs du faisceau observés en 1998, sur lesquels plusieurs couches de fils présentaient des fils rompus (quatre couches pour l'un, deux couches pour l'autre) (Fig. 3), un toron intérieur au faisceau était aussi dégradé sur plusieurs couches de fils, et deux autres torons (un externe au faisceau et un intérieur au faisceau) montraient des fils Z rompus sur leur première couche. Toutes les ruptures étaient situées sous l'entrée basse du collier (le collier étant incliné, la partie la plus proche du tablier est appelé « entrée basse »). Sous l'entrée haute du collier, des fissures ont été détectées sur des fils des couches externes des torons déjà endommagés en entrée basse.

L'étude des faciès confirme les résultats des analyses de 1998 : fissuration de surface (Fig. 4) puis propagation avant rupture (Fig. 5). Sur ces figures, la direction des amorces de surface est proche de l'angle que font deux couches de fils entre elles (60°), mais n'est pas égale à cet angle. Cette direction n'est pas liée à la texture du métal. Les surfaces de propagation ne présentent pas les caractéristiques de fissures de fatigue pure ni celles de corrosion fissurante sous contrainte comme seule et unique source d'existence. La conjugaison des deux phénomènes, associée aux contraintes variables de frottement en surface des fils pour l'amorçage, puis la synergie corrosion/contrainte variable pour la propagation des fissures, ont donc été les mécanismes globaux à l'origine des ruptures de fils.

Les dégradations ont affecté en premier lieu les couches de fils externes des torons puis, progressivement, les couches successives suivantes sur lesquelles les sollicitations augmentent au fur et à mesure que disparaissent les éléments de la couche supérieure.

On a remarqué, par ailleurs, comme sur d'autres ouvrages, que la réorganisation des couches de fils lors de l'ouverture d'un collier sur un faisceau dégradé ralentit fortement le phénomène de rupture, grâce aussi à la rénovation de la protection anticorrosion faite à cette occasion et à la mise en place de plaques de zinc entre collier et faisceau (lorsque cette modification est possible).



□ **Figure 3**

Toron dégradé sous collier 8. Trois couches de fils présentent des fils rompus visibles. Une quatrième couche, non visible, comporte des fils rompus.



□ **Figure 4**

Fil Z fissuré à proximité d'une rupture. Légère dégradation de surface par corrosion.



□ **Figure 5**

Surface de rupture d'un fil Z. La fissure (à gauche), origine de la rupture, présente un faciès mixte de propagation par fatigue corrosion.

Évaluation de la résistance ultime du câble R_{rup}

En raison des constatations de l'expertise de 1998, le comité technique décide d'apprécier la résistance ultime du câble en négligeant totalement la résistance des fils partiellement corrodés. En effet, en cas de surtension, ces fils cassent en « chaîne », les plus corrodés en premier puis, successivement, les autres fils, dans l'ordre inverse de leur degré de corrosion. La corrosion réduit simultanément leur résistance unitaire, par perte de section, et leur capacité d'allongement plastique. Une approche sécuritaire consiste donc à ne prendre en compte que les fils sains pour apprécier la résistance ultime du câble. Par ailleurs, l'état des torons internes (non visibles) est supposé comparable à l'état moyen des torons visibles, ce qui est une hypothèse sécuritaire comme l'a montré l'expertise du câble du pont de Tancarville. Les deux torons très dégradés sont ignorés, ainsi que les fils partiellement corrodés des autres torons. Dans ces conditions, la section résistante est estimée à 80 % de la section de 35 torons.

La résistance à la rupture est donc estimée à $4\,500 \times 35 \times 0,80 = 126\,000$ kN, au lieu de 166 500 kN pour un câble sain. Le coefficient de sécurité initial est diminué de 25 % et atteint 2 sous les charges de service (2,65 à vide), si la tension maximale en service est estimée à partir des calculs réglementaires.

À titre de référence, le coefficient utilisé dans le dimensionnement initial des ponts suspendus varie de 2,5 à 3,00 selon les pays. Dans une version provisoire de l'EC3 (ENV 1993-2 :1997), on trouvait 1,8 à l'ELU, soit environ 2,5 à l'ELS. On peut noter que, pour les haubans, on admet d'atteindre $0,45 F_{rg}$ en service, soit un coefficient de sécurité de 2,22 (1/0,45).

Une estimation plus précise de la tension maximale en service était donc indispensable.

Évaluation de la tension maximale en service R_{serv}

Pour connaître précisément la tension dans le câble sous charges permanentes et sous charges d'exploitation, on procède bien sûr à des calculs, mais aussi à des mesures directes des efforts dans les câbles. Ces mesures permettent de réduire l'incertitude existant sur la charge permanente du tablier et de préciser la valeur des actions d'exploitation.

Mesures de tension des câbles sous charges permanentes

La mesure des tensions sous charges permanentes de tous les torons dans les deux chambres d'ancrage rive droite a été réalisée en juin 1999. Celle-ci s'effectue par mesure de vibration selon la méthode d'essai LPC n° 35 [6], en vérifiant que le toron se comporte comme une corde vibrante entre son ancrage et le collier d'épanouissement. La difficulté principale est d'évaluer la longueur libre exacte du toron qui est fonction de son degré de blocage à l'intérieur du collier d'épanouissement. Toutefois, les mesures confirment la précision de la méthode : la dispersion des tensions mesurées sur les torons d'une même nappe est inférieure à 10 % autour de la valeur moyenne et la tension globale mesurée dans chaque câble est en conformité avec la note de calcul.

Le tableau II donne la valeur moyenne de la tension des torons élémentaires et la tension totale du câble. L'écart relatif entre les tensions globales des câbles amont et aval est inférieur à 1 %, ce qui apparaît comme un résultat remarquable.

TABLEAU II
Résultats des mesures de tension par méthode vibratoire

| Tensions mesurées | Amont | Aval |
|---------------------------------|--------|--------|
| Tension moyenne des câbles (kN) | 1 330 | 1 340 |
| Tension totale du faisceau (kN) | 49 300 | 49 640 |

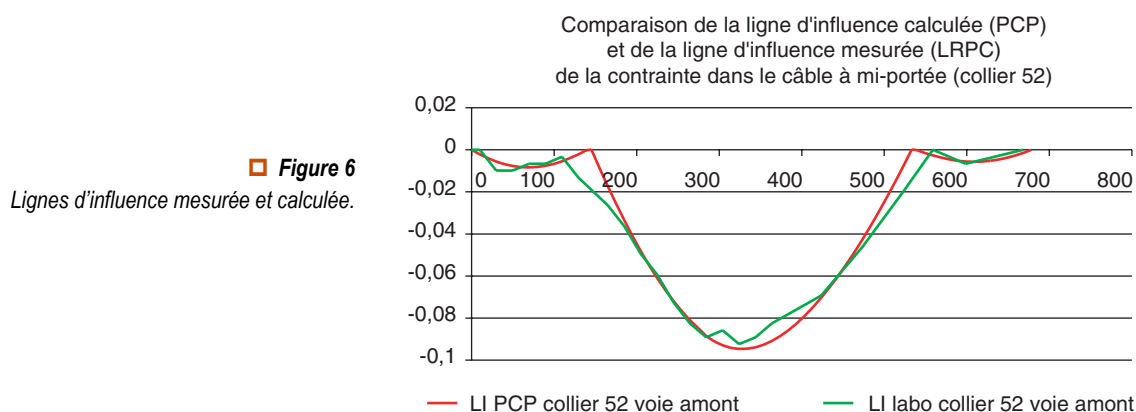
Valeurs extrêmes des charges routières

Le trafic routier a été enregistré par des stations de pesage en marche en septembre et octobre 1999. Les données brutes, issues des enregistrements, sont traitées pour simuler des situations d'embouteillage extrêmes sur l'ouvrage, voire de blocage de l'ouvrage par des PL (poids lourds). De plus, la section à mi-portée du câble a été instrumentée par des jauges de déformation, pour établir

la ligne d'influence des variations de contraintes normales et vérifier l'exactitude du modèle de calcul en grands déplacements (programme PCP du SETRA) (Fig. 6). Cette mesure a permis de confirmer l'exactitude du modèle de calcul, établi par ailleurs pour recalculer l'ouvrage. L'ouvrage a ensuite été calculé sous les trafics « virtuels » constitués à partir des enregistrements de trafic, à l'aide du programme CASTOR-LCPC (actuellement en cours de refonte et renommé POLLUX), cela a permis de déterminer les valeurs extrêmes des efforts dus au trafic.

Le trafic normal crée une augmentation de tension maximale dans le câble de 1 863 kN avec une période de retour d'une semaine et de 2 560 kN avec une période de retour de 100 ans, dans l'hypothèse d'un niveau de trafic stationnaire. Un trafic totalement saturé, simulé par suppression des inter-distances entre véhicules dans les enregistrements de trafic, crée une « sur-tension » de 3 885 kN. Ces valeurs sont à comparer avec l'effet calculé des charges routières réglementaires, qui est de 12 280 kN (chargement « A(l) » cinq voies).

Le trafic enregistré a également été traité pour simuler les situations d'embouteillage les plus critiques (opérations escargots de PL). Les véhicules légers sont enlevés des enregistrements et les inter-distances entre PL réduites à zéro. Sous ce trafic, l'augmentation de tension est de 8 630 kN, soit 0,7 fois l'effet des surcharges réglementaires. De plus, cette situation peut être évitée car l'ouvrage fait l'objet d'une haute surveillance.



Évaluation déterministe du coefficient de sécurité

Les mesures ont donc permis de préciser la tension maximale en service d'un câble porteur (charge permanente et charge d'exploitation). La valeur obtenue est de 49 640 (tension à vide) + 3 885 (effet du trafic saturé), soit 53 525 kN. Le coefficient de sécurité en service peut donc être estimé à 126 000/53 525, soit **2,35**. Cette valeur donne une certaine marge par rapport à la valeur de 2 obtenue avant les mesures. La réduction par rapport à la valeur de conception (2,5) est seulement de 6 %.

APPROCHE PROBABILISTE DE LA RÉSISTANCE DU CÂBLE. EXEMPLE DU PONT DE TANCARVILLE

L'aptitude au service du pont d'Aquitaine n'a pas été vérifiée par une approche probabiliste, en l'absence de données fiables permettant de définir la variable aléatoire décrivant la loi de comportement d'un fil. De plus, la modélisation du câble à partir des torons, et des torons à partir des fils individuels, est un problème particulièrement complexe qu'il n'était pas possible de traiter correctement « en temps réel ».

Il est toutefois possible de présenter cette approche sur l'exemple du pont de Tancarville [5], pour lequel l'expertise des câbles réalisée après dépose a fourni les informations nécessaires. Le pont de Tancarville comporte trois travées suspendues de 396 m, 608 m et 396 m. Le câble porteur comporte 56 torons en travée de rive et 60 en travée centrale ; chaque toron est constitué de 169 fils ronds de 47 mm de diamètre.

Chaque toron est modélisé par une succession de tronçons de toron en série, d'une longueur individuelle de 0,80 m, égale à un pas de toronnage. Il s'agit de la valeur estimée de la longueur de réancrage d'un fil unitaire. Sur cette longueur, les fils forment un système en parallèle (Fig. 7).

De même, le câble est modélisé par une succession de tronçons de câble, d'une longueur de 8 m, distance entre deux colliers successifs. Il s'agit de la valeur estimée de la longueur de réancrage d'un toron. Sur cette longueur, les torons forment un système en parallèle.

L'objectif est de remonter des endommagements individuels des fils à la dégradation globale et donc à la résistance effective du câble, sans calculs prohibitifs. Crémona et Rasson [7, 8] ont analysé un câble du pont de Tancarville par simulation de Monte-Carlo. Cependant, l'étude d'un tel câble conduit à simuler $60 \text{ torons} \times 1\,750 \text{ tronçons/toron} \times 168 \text{ fils/toron} = 1\,774\,500 \text{ fils}$ pour un câble. Si l'on veut tirer un estimateur correct de la valeur moyenne de la résistance d'un câble, il faut générer raisonnablement 1 000 câbles, ce qui devient vite très consommateur en temps de calculs. Il a donc été jugé indispensable de disposer d'une approche se distinguant des démarches classiques par un découplage total entre l'échelle du fil (en fait du tronçon de toron) et l'échelle du câble. Cela permet de discriminer une étape locale où il s'agit de déterminer la loi de comportement globale d'un tronçon de toron pris isolément et indépendamment du câble auquel il est censé appartenir, et d'évaluer ainsi sa réponse en termes de distributions statistiques. La seconde étape vise à fournir des lois explicites de l'étape précédente. L'un des points essentiels pour rendre la démarche de simulation crédible et pertinente est enfin de pouvoir inclure toute information issue de la surveillance concernant la répartition spatiale et le développement temporel de la corrosion à l'échelle fil/couches de fils et à l'échelle des tronçons de torons.

Cette approche a été développée en partenariat avec l'université de Bordeaux [9] sur la base de travaux antérieurs réalisés au LCPC.

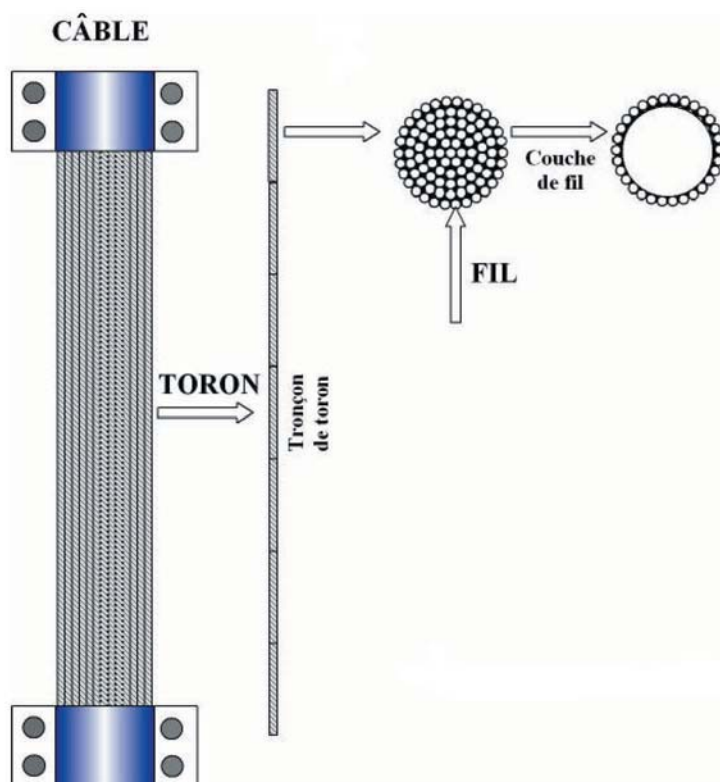


Figure 7
Modélisation d'un toron

Modélisation probabiliste de la résistance d'un fil

Les données nécessaires à la modélisation résultent d'une importante campagne d'essais de traction menée au LCPC après dépose des câbles sur des tronçons de fils de 70 cm de longueur. Seuls les fils peu corrodés sont pris en compte. Les fils rompus ou fortement corrodés sont ignorés. Le tableau III donne quelques résultats d'essais pour les couches 3 à 6 d'un toron. Les couches extérieures 1 et 2 n'ont pas été étudiées car fortement corrodées.

Un modèle de comportement élasto-plastique du tronçon de fil élémentaire de 70 cm est établi à partir des résultats d'essai. Il comprend une première partie linéaire, puis une seconde partie parabolique, pour décrire le comportement élasto-plastique. Le modèle de comportement est donc décrit par quatre variables aléatoires : (ϵ_e , σ_e , ϵ_u , σ_u) (déformation élastique et limite d'élasticité, déformation ultime et contrainte ultime) (Fig. 8).

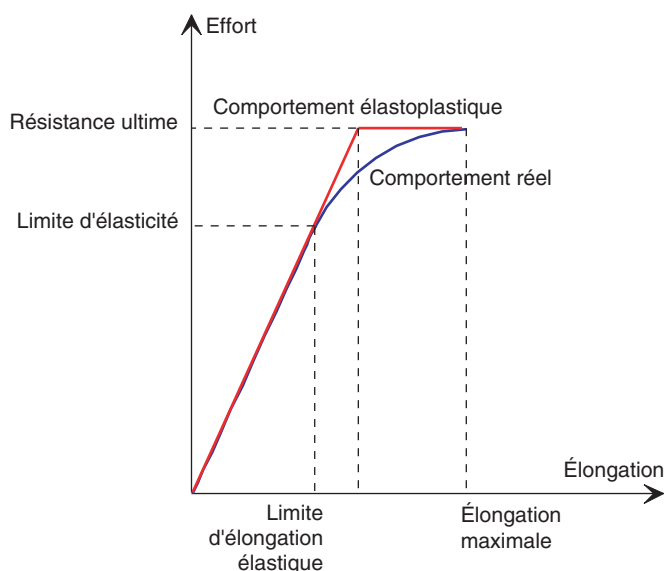
De par le processus de fabrication, la variabilité inter-fils suggère de décrire les variables du modèle, σ_e , ϵ_e , σ_u , ϵ_u par des variables aléatoires. Le choix des lois (normale, lognormale, Weibull...) et de leurs paramètres statistiques peut s'appuyer sur des analyses de données expérimentales, mais aussi sur des données de la littérature. Les études expérimentales [10] ont permis d'estimer l'effort maximal de rupture des fils et d'identifier la loi de comportement « effort-allongement ». La figure 9 illustre la validation du choix de la forme de la loi de comportement en traction du fil en comparant deux fils d'une même couche.

TABLEAU III
Propriétés des fils mesurées après dépose

| Couche | ϵ_e (%) | $\sigma_e \times 10^3$ MPa | ϵ_u (%) | $\sigma_u \times 10^3$ MPa |
|--------|------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| 3 | 0,65 | 0,90 | 1,20 | 1,44 |
| | 0,48 | 0,84 | 1,26 | 1,48 |
| | 0,38 | 0,71 | 1,14 | 1,39 |
| 4 | 0,78 | 0,94 | 1,32 | 1,38 |
| | 0,62 | 0,92 | 1,36 | 1,46 |
| | 0,84 | 1,08 | 1,72 | 1,48 |
| 5 | 1,32 | 1,08 | 2,11 | 1,48 |
| | 1,04 | 0,93 | 1,80 | 1,34 |
| | 0,92 | 0,94 | 1,54 | 1,30 |
| 6 | 1,14 | 0,99 | 2,30 | 1,44 |
| | 1,30 | 1,02 | 2,46 | 1,42 |
| | 1,52 | 1,15 | 2,10 | 1,46 |

22

Figure 8
Modèle de comportement.



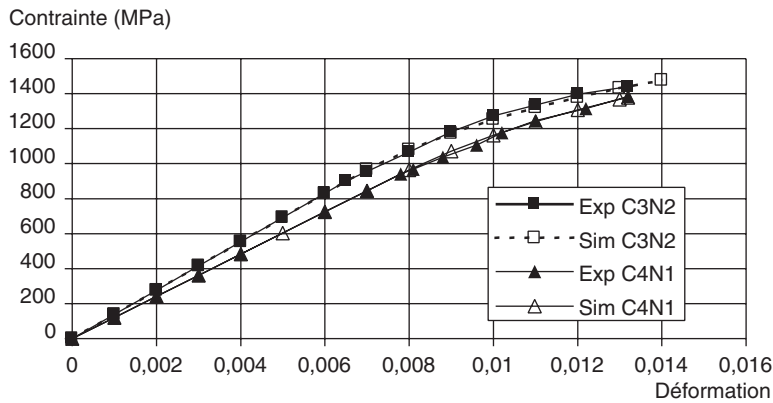


Figure 9
Validation du modèle de loi de comportement d'un fil pour 2 fils du pont de Tancarville.

Prise en compte de la corrosion

Deux niveaux sont nécessaires pour appréhender le rôle de la corrosion sur le comportement mécanique d'un fil. S'agissant d'un processus de dégradation évolutif, il est nécessaire d'introduire une loi temporelle de dégradation dans le modèle. L'état d'un fil est décrit par son appartenance à une **classe saine** ou une **classe dégradée** – ou corrodée. Un fil peut donc passer d'un état sain à un état corrodé. Le changement d'état sur un intervalle τ est conditionné par une **probabilité de transition** $p_i(\tau)$. Cette probabilité dépend de la couche d'appartenance du fil suivant l'hypothèse qu'elle décroît en fonction de l'ordre de la couche. On supposera également qu'elle reste constante par couche. Il est ainsi possible de définir pour l'ensemble des fils du tronçon de toron une probabilité de transition moyenne qui s'exprime par :

$$\bar{p}(\tau) = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} N_i p_i(\tau)$$

où N_c est le nombre de couches. À cette probabilité de transition moyenne, il est possible d'associer une valeur moyenne du temps d'amorçage de la corrosion t_0 égale à $(1 - \bar{p}(\tau))/\bar{p}(\tau)$ (exprimé en nombre d'intervalles τ).

Dans le cas de la suspension du pont de Tancarville, une répartition linéaire de la corrosion en fonction de la couche a été retenue. On déduit ainsi que $\bar{p}(\tau = 1 \text{ an})$ vaut $6,054 \cdot 10^{-2}$. Le temps de d'amorçage moyen est alors de 15,5 ans [10].

La corrosion peut se manifester par une perte de matière sur une zone étendue qui conduit à une réduction de la section du fil. On parle alors de **corrosion par dissolution**. Elle peut également être localisée, se traduisant par la propagation d'une fissure au niveau d'une zone confinée. La seconde approche est très délicate de mise en œuvre. En l'absence d'information plus précise, seule la corrosion par dissolution a été introduite dans les analyses. Un modèle simple peut être aisément adopté :

$$c(t) = \alpha(t - t_0)^\beta$$

où $c(t)$ représente la perte de matière (diminution du diamètre du fil), t_0 l'instant d'amorçage de la corrosion du fil, α le taux ou la vitesse de corrosion et β un paramètre de tendance de progression de la corrosion. Ces deux paramètres sont fortement corrélés et possèdent, pour un même site, une variabilité élevée car les conditions de l'environnement varient localement.

Modélisation probabiliste de la résistance d'un toron

La loi de comportement globale du tronçon de toron s'exprime par :

$$F_T(u, t) = \sum_{i=1}^N F_{f,i}(u, t)$$

où $F_T, F_{f,i}$ sont respectivement l'effort dans le tronçon et dans un fil, N étant le nombre de fils par tronçon. Étant donné que $F_{f,i}$ et, par conséquent, F_T , sont fonctions de variables aléatoires, la détermination de $F_T(u, t)$ repose sur des simulations de Monte-Carlo.

La simulation permet de générer la loi de comportement d'un toron que l'on cherche à décrire sous la forme :

$$F_T(u, t) = K_T (1 - D(u)) (1 - \delta(t)) u$$

u est le déplacement du tronçon de fils et K_T est la rigidité initiale du tronçon. Cette équation repose sur l'hypothèse de séparation des dégradations matérielles liées à la rupture des fils par allongement et caractérisées par la fonction d'endommagement $D(u) \in [0,1]$ des dégradations de corrosion identifiées par la fonction de dégradation $\delta(t) \in [0,1]$. Par analogie avec les travaux de Daniels [11], la fonction d'endommagement peut se définir par [10] :

$$D(u) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N F_{f,i}(u)}{K_T u} (1 - H(u))$$

Si le nombre de fils est important, la loi des grands nombres permet d'établir que la loi de distribution F_{FT} est une loi normale [11] :

de moyenne :

$$E[F_T(u)] = E[K_T] (1 - E[D(u)]) u$$

et d'écart-type :

$$\sqrt{V[F_T(u)]} = E(F_f(u)) \sqrt{N} \left(\frac{\sqrt{V[K_T]}}{E[K_T]} + \sqrt{H(u)(1-H(u))} \right)$$

Les différents termes moyens sont estimés par simulations de Monte-Carlo. Une expression analogue à celle caractérisant le processus de dégradation des fils peut être retenue pour la fonction de corrosion à l'échelle du toron :

$$\delta(t) = A (t - t_0)^B$$

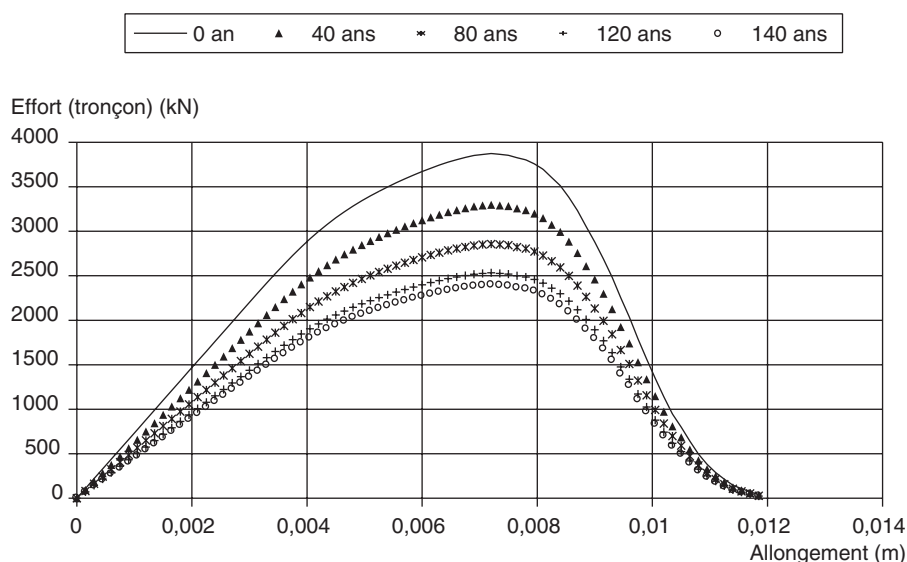


Figure 10
Lois de comportement moyennes en fonction du temps.

Les paramètres A, B sont identifiés par la méthode des moindres carrés en ajustant la réponse numérique du tronçon de toron et la loi précédente. Comme pour la fonction de dégradation, l'existence d'une loi analytique fournit un avantage substantiel dans le cadre d'une approche multi-échelles.

L'effet de la corrosion sur le comportement d'un tronçon de toron du pont de Tancarville est présenté sur la figure 10. Les courbes mettent en évidence que la corrosion influe sur la rigidité initiale du tronçon et sur l'effort résistant maximal (réduction de 27 % en 80 ans).

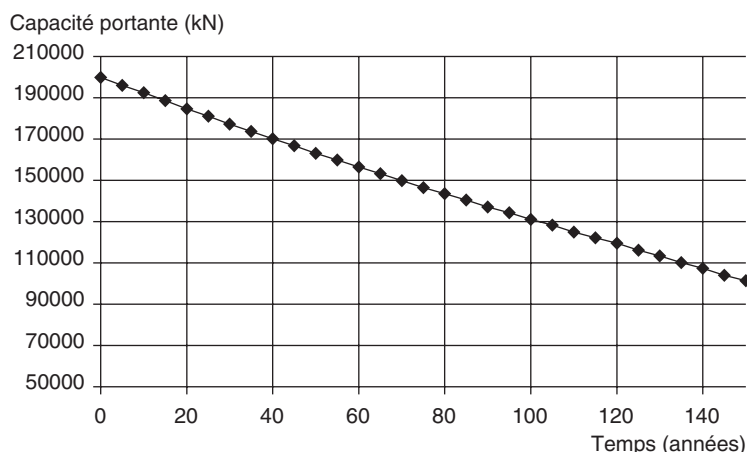
L'étude plus précise des résultats menée par Elachachi [9] indique que la valeur de la fonction de corrosion à un instant donné est indépendante de la partie de la courbe considérée (linéaire ou non linéaire). Cela permet de valider l'hypothèse selon laquelle les dégradations matérielles peuvent être considérées comme **découplées** des dégradations de corrosion à l'échelle du toron. La méthode des moindres carrés conduit à identifier les paramètres $A = 0,00986$ et $B = 0,747$.

Modélisation probabiliste de la résistance du câble

Étant donné que le maximum des efforts n'est pas atteint au même instant et pour les mêmes déformations (déplacements) et que des mécanismes de redistribution se manifestent, il est indispensable de recourir à des simulations de Monte-Carlo à l'échelle du câble pour être en mesure de déterminer son comportement global $F_c(u, t)$ et, en particulier, sa capacité portante R_c au cours du temps. Le passage de l'échelle du tronçon de toron à celle du câble s'effectue par l'adoption d'un système parallèle-série. Le système câble est constitué de r torons en parallèle, chacun possédant m tronçons en série. Le nombre de tronçons à prendre en compte est lié à la capacité de réancrage des torons (et non plus des fils). Pour une suspension à fils ou torons parallèles, il est admis que cette longueur de réancrage est comprise entre 1 et 3 distances entre colliers de serrage.

L'un des câbles de l'ancienne suspension du pont de Tancarville était constitué de 60 torons. Chaque toron est composé de dix tronçons en série (sur la base d'une longueur de réancrage entre torons égale à la distance entre deux colliers de serrage), chacun de ces tronçons étant composé de 169 fils. Le découplage est effectif entre l'échelle du fil et celle du câble, les lois du comportement d'un tronçon de toron étant utilisées à l'échelle du câble et calculées selon la démarche précédente. Ces expressions analytiques pour un tronçon du fil permettent d'étudier le comportement du câble sans avoir besoin de revenir aux composantes des fils. La figure 11 donne l'évolution de la capacité portante au cours du temps en tenant compte du processus de corrosion.

Il faut rappeler que cette estimation est fondée sur l'hypothèse favorable d'un processus de corrosion par dissolution. Dans le cas du pont d'Aquitaine, l'existence simultanée d'une corrosion sous contrainte est un facteur aggravant, qui se traduit par une augmentation rapide de la vitesse d'endommagement après la période d'amorçage.



□ Figure 11

Évolution de la capacité portante moyenne avec le temps.

Au moment du remplacement de la suspension du pont de Tancarville, la valeur caractéristique (fractile 5 %) est de **170 000 kN**.

Cette valeur peut être comparée au résultat d'un calcul déterministe grossier, mené de la façon suivante :

- selon les résultats des inspections, 1,6 % des fils au maximum sont rompus dans une section donnée. Le nombre de fils à considérer est donc : $56 \times 169 \times 0,984$, soit 9 312 fils ;
- résistance ultime moyenne d'un fil : $\pi r^2 \times 1\,422$ MPa (moyenne du tableau II), soit 24,67 kN ;
- résistance ultime du câble : $9\,312 \times 24,67 = 229\,735$ kN.

La valeur caractéristique qui résulte du calcul probabiliste est donc de **25 %** inférieure à celle qui résulte du calcul déterministe de la somme des résistances ultimes unitaires des fils. Cette réduction résulte de la rupture en chaîne des fils endommagés, par manque de ductilité. Il n'est donc pas possible d'atteindre un état d'allongement ou chaque fil serait tendu à sa résistance ultime. Ces résultats justifient l'approche prudente adoptée dans l'estimation de la capacité portante des câbles du pont d'Aquitaine.

ANALYSE DES PHÉNOMÈNES SUSCEPTIBLES DE SE PRODUIRE

Si l'on revient à ce dernier ouvrage, et à l'appréciation de la situation fin 1999, les phénomènes prévisibles sont la fatigue, l'usure par frottement inter-filaire et la corrosion fissurante sous tension. Ces phénomènes sont interdépendants. Comme indiqué précédemment, l'expertise des fils rompus montre que la corrosion fissurante s'amorce dans les zones de frottement inter-filaire. Les variations de contrainte dues au passage du trafic amplifient les frottements et peuvent favoriser la propagation des fissures.

La vitesse de dégradation est difficile à prévoir, mais il est possible de la mesurer et de pronostiquer son accélération. Le suivi est fondé sur la surveillance acoustique des ruptures de fils et l'examen visuel périodique des câbles.

Le phénomène de rupture par corrosion sous tension va en s'accélération car chaque toron porteur fonctionne à tension constante. Si un fil casse, il ne se détend que très localement, sur quelques décimètres de part et d'autre de la rupture (un pas de toronnage). Sur cette longueur de transition, sa tension est transmise aux fils voisins qui se surtendent. Comme la corrosion sous tension s'accélère avec la tension, la vitesse de corrosion des fils voisins augmente. Une deuxième cause d'accélération est le vieillissement simultané de tous les fils. Les fils situés dans la même configuration ont le même âge et atteignent donc leur limite de durée de vie à des dates voisines.

Étude des risques de fatigue

La deuxième utilité des mesures de trafic réalisées en octobre 1999 a donc été de préciser les risques de fatigue dans le câble porteur, sous l'effet du trafic PL. Les zones critiques sont situées à la sortie des colliers d'attache des suspentes. En effet, la surtension de la suspente lors du passage d'un PL est transmise au câble porteur par le collier. Sous cette force localisée, le câble subit une variation d'allongement et de courbure, susceptible d'endommager en fatigue les fils externes des torons, en particulier s'ils sont partiellement corrodés.

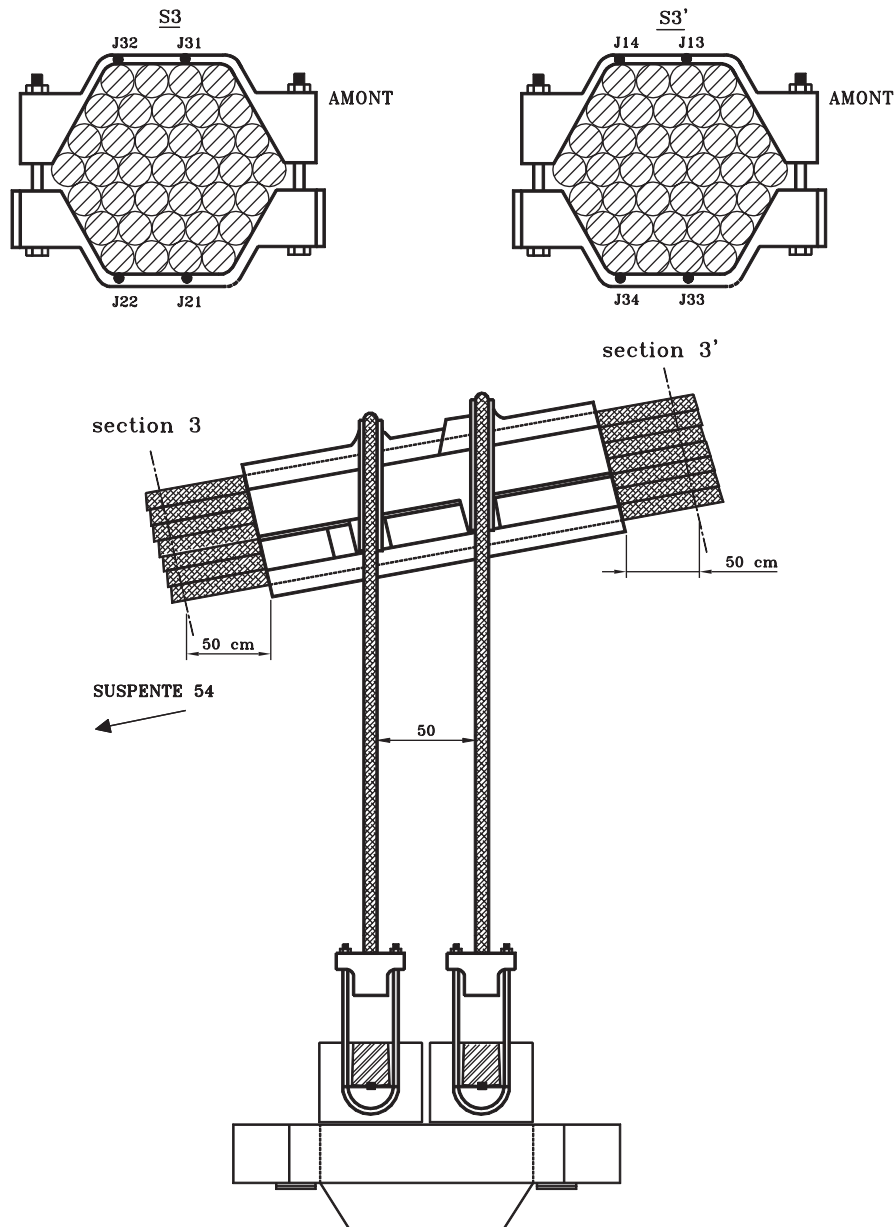
Des sections ont donc été instrumentées par des jauges de déformation, pour établir les lignes d'influence des déformations longitudinales des fils externes du câble lors du passage d'un camion sur la voie la plus proche. Les mesures ont été faites à l'aide de jauges montées en quart de pont, collées sur les fils unitaires des torons. Trois sections successives du câble, situées respectivement à 4 cm, 25 cm et 50 cm du collier 52 (au tiers de la grande travée) ont été équipées. Les jauges ont été collées au niveau des fibres supérieure, moyenne et inférieure du câble (Fig. 12).

Les mesures ont permis de déterminer l'effet de la flexion locale. Lors du passage du camion d'essai (Fig. 13), la déformation moyenne du câble augmente de 12 μ def. La flexion ajoute un allongement de 2 μ def en fibre inférieure.

Il résulte des mesures et des calculs effectués que l'amplitude de la variation de la contrainte moyenne dans un câble ne dépasse pas 16 MPa sur une période de retour d'une semaine. S'ajoute l'effet de flexion en sortie de collier (5 MPa), soit au total 21 MPa. En appliquant encore une majoration forfaitaire de 20 % pour se placer dans la section la plus critique sous collier, on peut affirmer que l'amplitude de la variation de contrainte ne dépasse pas 25 MPa sur une période de retour d'une semaine.

SUSPENTE 52

JAUGES D'EXTENSOMETRIE



□ **Figure 12**

Instrumentation d'une section en sortie de collier.

La catégorie de détail (résistance à $2 \cdot 10^6$ cycles) retenue pour la vérification simplifiée à la fatigue est de 80 MPa. Il s'agit d'une valeur prudente car les recherches menées [12] concluent à une limite d'endurance comprise entre 100 et 150 MPa selon les conditions du frottement inter-filaire, mais le début de corrosion des fils et l'effet d'étreinte du collier justifie de retenir une valeur plus faible. La limite de troncation en fatigue est alors 32 MPa. Compte tenu des effets calculés du trafic, il n'y a pas de risque de fatigue.

Ce résultat est confirmé par l'étude de l'historique des variations de contrainte. Le logiciel CASTOR-LCPC déjà mentionné permet de calculer l'histogramme des rain-flow des étendues de contrainte, sous l'effet du trafic réel (Fig. 14). On constate que les amplitudes de variations de contraintes sont très faibles (seules 5 % sont supérieures ou égales à 5 MPa) et ne génèrent donc pas d'endommagement de fatigue.

Figure 13
Lignes d'influence ; effet de la flexion en sortie de collier ($\mu_{def} = 10^{-6}$).

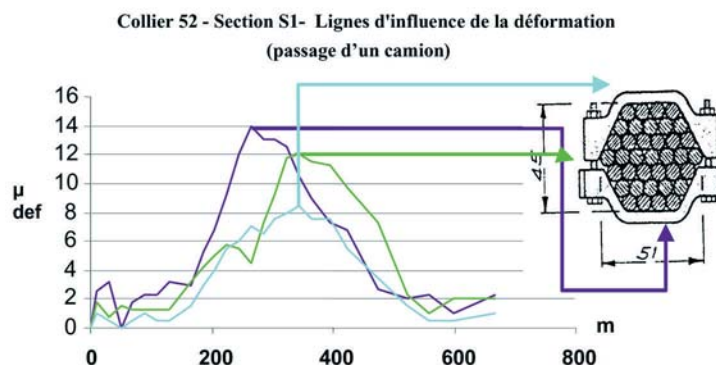
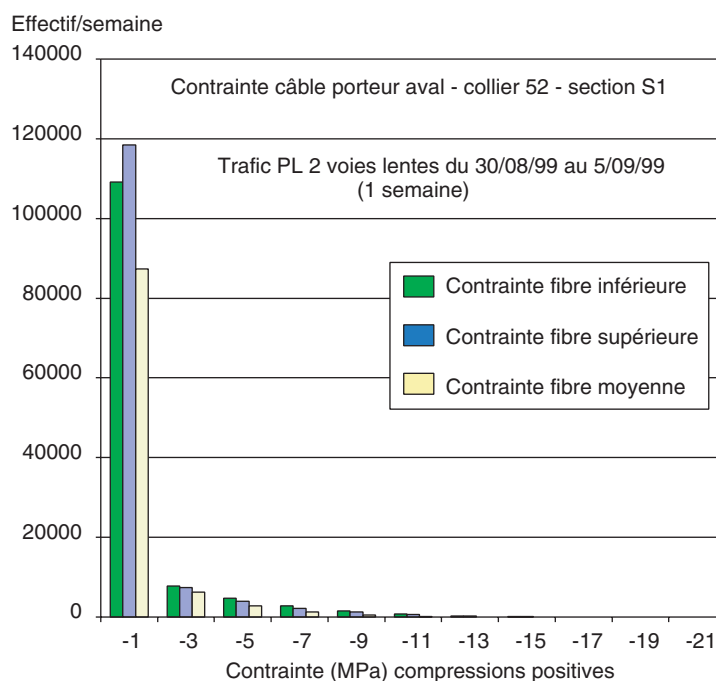


Figure 14
Histogramme des rain-flow (nombre d'événements par classe de variation de contraintes).



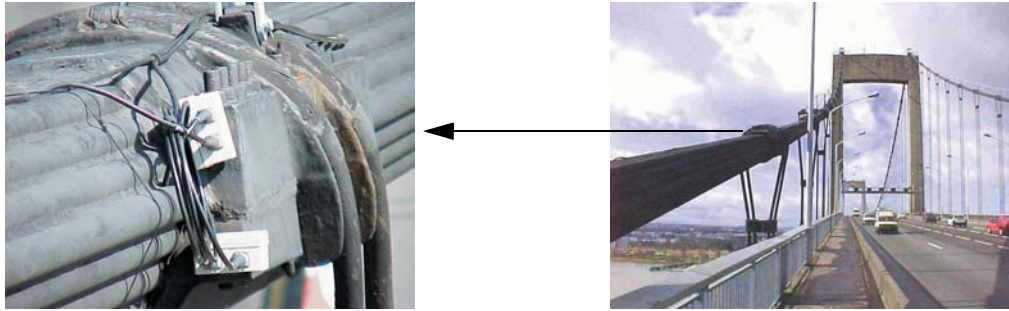
DÉFINITION DES GRANDEURS PHYSIQUES MESURABLES ET MISE SOUS HAUTE SURVEILLANCE

Principes de la haute surveillance

Les principes de la haute surveillance des ouvrages d'art pathologiques sont définis dans l'instruction technique [3]. Il s'agit de surveiller les grandeurs physiques mesurables caractérisant l'évolution vers une situation dangereuse et de définir les mesures à prendre en fonction de cette évolution. Comme l'explique Cl. Bois dans [2], la surveillance systématique des grands ponts suspendus repose principalement sur des inspections visuelles périodiques pour détecter les ruptures des fils des couches extérieures des torons périphériques.

La mise sous haute surveillance du pont d'Aquitaine consista en un renforcement de l'examen visuel qui fut effectué tous les mois, complété par une extension de la surveillance acoustique à toute la suspension : chaque collier fut équipé de deux capteurs, le nombre total de capteurs de surveillance acoustique sur l'ouvrage passant à 328 (Fig. 15).

Si, au pont de Tancarville, la surveillance acoustique mise en œuvre n'avait pas posé de problème particulier d'interprétation, en revanche, au pont d'Aquitaine, celle-ci dut être adaptée. En effet, le signal reçu par un capteur était assez rarement détecté par les capteurs placés sur les colliers



□ **Figure 15**
Surveillance acoustique du pont d'Aquitaine.

adjacents, vraisemblablement en raison de l'amortissement élevé qui existe à l'intérieur de ce type de collier ainsi qu'à l'intérieur du câble proprement dit. Le seuil de détection des capteurs dut être abaissé à 2 g ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), sauf pour les capteurs soumis à un bruit de fond trop important (celui-ci pouvait atteindre 20 à 30 g en certains colliers). La plupart des ruptures qui se produisirent provoquèrent un signal de l'ordre de 20 g sur le capteur le plus proche, alors que les capteurs situés sur les colliers adjacents n'enregistrèrent qu'un signal de 1 ou 2 grammes.

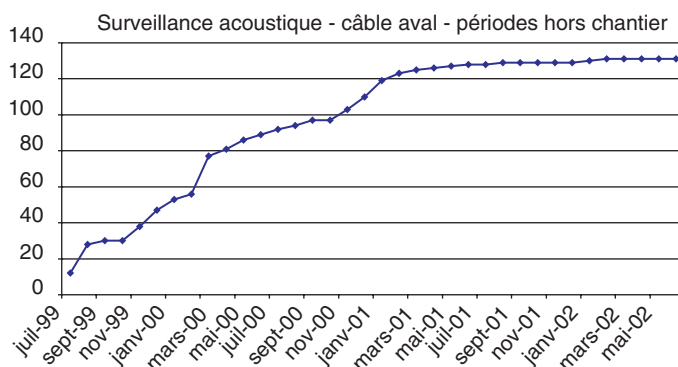
Après une période d'observation et d'élimination des bruits parasites, une rupture fut définie comme un événement caractérisé par la transmission du signal sur au moins deux colliers, quelle que soit l'amplitude mesurée, avec une vitesse de l'onde comprise entre 3 500 et 7 000 m/s. La surveillance acoustique fut maintenue jusqu'à l'achèvement des travaux de remplacement des câbles porteurs. Mais, pendant les travaux, seuls furent comptabilisés les événements survenant en dehors des périodes de chantier (de 19 h à 7 h en semaine) en raison des bruits parasites importants dus au chantier. Toutefois, les événements survenant en période de chantier furent analysés et corrélés avec l'activité sur le site.

Les seuils d'alerte débouchant sur une réunion d'urgence du comité technique furent fixés à dix ruptures de fil par mois ou à 150 ruptures au total, dans une section d'un câble [2].

Résultats de la haute surveillance

La figure 16 présente le résultat de la surveillance acoustique du câble aval entre juillet 1999 et mai 2002.

De juillet 1999 à décembre 2000, on constata une évolution relativement régulière du nombre de ruptures, à la vitesse de sept ruptures nouvelles par mois (pendant les périodes hors chantier). Les dégradations furent un peu plus rapides pour le câble amont (dix ruptures nouvelles par mois en moyenne).



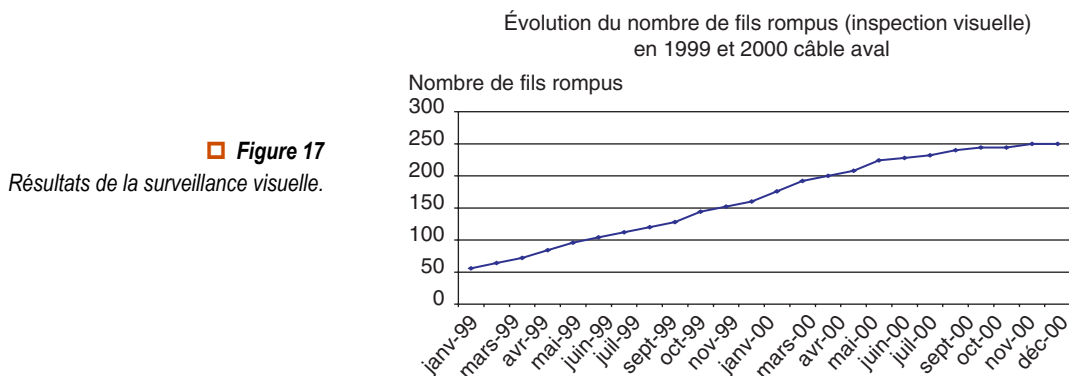
□ **Figure 16**
Résultats de la surveillance acoustique.

La vitesse de dégradation diminua fortement à partir de février 2001, soit deux mois après la mise en œuvre de la première suspension auxiliaire, qui réduisit de 10 % la tension du câble (cf. ci-après). La vitesse de dégradation s'annula presque complètement à partir d'octobre 2001, date de mise en œuvre de la deuxième suspension auxiliaire.

Les résultats de la surveillance acoustique purent être globalement corrélés avec ceux de la surveillance visuelle, présentés sur la figure 17. En effet, il fut constaté que le nombre total de ruptures de fils enregistrés au sein du câble aval pendant la période de juillet 1999 à décembre 2000 était égal respectivement à 120 pour la surveillance acoustique (hors période de chantier) et à 140 pour la surveillance visuelle. Toutefois, il s'avéra impossible d'assurer une corrélation fine, section par section, des deux types de surveillance. Cet « échec » fut l'un des soucis majeurs du comité technique. Il fut attribué au décalage dans le temps entre la rupture d'un fil externe et la rupture du film de peinture qui le protégeait, décalage qui résultait de la déformation plastique de la protection anti-corrosion. Ce décalage, estimé à quelques mois, expliquerait que les nouvelles ruptures vues chaque mois ne correspondaient pas aux ruptures entendues pendant la même période.

La figure 17 montre l'évolution du nombre de fils rompus vus sur le câble aval, entre janvier 1999 et décembre 2000. En janvier 2001, on comptabilisait 255 ruptures « visualisées ». Ce chiffre n'évolua plus pendant les six premiers mois de l'année 2001. En juin 2001, il n'y avait que cinq ruptures supplémentaires. Cette stabilisation des évolutions résulta très certainement de la mise en place de la première suspension auxiliaire en décembre 2000, comme déjà mentionné pour la surveillance acoustique.

En juin 2001, les examens visuels durent être interrompus pour des problèmes d'accès, pendant une année. Un nouvel examen ne put être fait qu'en juin 2002, avec des moyens d'accès différents (examen par des alpinistes). Le bilan sur un an était de quatre nouvelles apparitions de fils rompus.



Conclusions sur la phase de haute surveillance

Les deux modes de surveillance sont donc très complémentaires. La surveillance visuelle est précise, mais limitée aux fils externes hors colliers. La surveillance acoustique ne détecte que les ruptures les plus énergétiques, mais elle est globale. Elle avertirait ainsi de toute évolution majeure de l'état du câble, comme la rupture complète d'un toron interne, nécessairement très énergétique.

CHOIX DU REMPLACEMENT DE LA SUSPENSION

Le comité technique constitué par la Direction des routes devait définir les mesures d'urgence à prendre, proposer une solution pour traiter le problème, et suivre les études et les travaux. Une réparation partielle ne pouvait être envisagée, et il n'existait pas de solution pour figer les câbles dans leur état de dégradation. La seule solution qui s'imposait était le remplacement complet de la suspension, selon un principe proche de celui appliqué précédemment au pont de Tancarville [13].

SOULAGEMENT DE LA SUSPENSION

Le renforcement provisoire de la suspension par des torons supplémentaires, avant sa dépose, avait été prévu dans le projet de réparation pour éviter d'augmenter les sollicitations appliquées aux câbles pendant les travaux, qui impliquent une augmentation de la charge permanente de l'ordre de 10 %, compte tenu de l'élargissement du tablier. L'opération consiste à placer au-dessus de chaque câble existant quatre torons de mêmes caractéristiques que ceux en place ; leur mise en tension soulage de 10 % la sollicitation des câbles en place. Cette solution a été retenue et la suspension auxiliaire a été mise en tension en décembre 2000. Les dispositifs de fixation de la suspension auxiliaire étaient tels que l'on pouvait, dans un délai assez court, mettre en place quatre torons supplémentaires par câble, dont la mise en tension soulagerait encore de 10 % les câbles existants. On comptait ainsi être en mesure, si le besoin s'en faisait sentir, de ralentir la progression des ruptures si le rythme en devenait inquiétant. Compte tenu de l'apport très positif de la première suspension auxiliaire, il fut décidé de mettre en œuvre la seconde suspension auxiliaire, ce qui réduisit encore de 10 % la tension du câble porteur. Cela fut fait en octobre 2001.

PROJET DE RÉPARATION ET SOLUTION RETENUE

Le projet de réparation a été confié au groupement Setec TPI – Cowi A/S, avec les objectifs suivants :

- remplacement de l'ensemble de la suspension en reprenant le plus rapidement possible les efforts supportés par la suspension actuelle ;
- élargissement du tablier par des structures en encorbellement de façon à déporter les pistes cyclables et les trottoirs, et gagner ainsi une voie de trafic supplémentaire ;
- maintenir le trafic, avec cependant la possibilité d'un nombre très réduit de coupures complètes de quelques heures.

Le lecteur pourra se reporter aux articles [14, 15], qui détaillent ce projet.

Quatre solutions furent étudiées :

- ① étaient du tablier par des appuis placés dans la Garonne, ce qui facilitait grandement le changement des câbles, avec une réutilisation des ancrages existants ;
- ② remplacement des câbles existants par des câbles déportés vers l'extérieur et ancrés dans de nouveaux massifs prenant appuis sur les massifs existants ;
- ③ remplacement de chaque câble par deux câbles placés de part et d'autre du câble existant, avec réutilisation des ancrages existants ;
- ④ introduction de haubans en remplacement partiel ou total de la suspension existante.

La solution retenue fut la deuxième. La première solution fut éliminée principalement à cause de la gêne importante pour le trafic fluvial et des risques de chocs de bateaux. La troisième (inspirée de la réparation de Tancarville) ne fut pas retenue car elle ne permettait pas l'élargissement voulu. La quatrième fut aussi éliminée car elle modifiait fortement le schéma statique de fonctionnement du tablier, avec la nécessité d'établir une continuité du tablier au niveau des pylônes et de renforcer la poutre de rigidité pour résister à la compression apportée par les haubans, et avec la difficulté de modifier les têtes de pylônes pour y ancrer les haubans.

Le marché de réparation fut attribué au groupement GTM-Dumez-Baudin Châteauneuf, pour un montant de 42,8 millions d'euros, pour réaliser la deuxième solution. La nouvelle suspension est donc excentrée de 2 m à l'extérieur du tablier qui se retrouve accroché aux nouvelles suspentes par l'intermédiaire de consoles fixées sur les poutres de rigidité. Les suspentes verticales sont fixées en partie supérieure aux colliers par des chapes étriers, et au tablier par des culots circulaires. Au sommet des pylônes, l'installation des nouvelles selles excentrées de 2 m nécessite un renforcement par précontrainte des têtes de pylônes. Des pistes cyclables de largeur 1,70 m sont placées à l'extérieur de la nouvelle suspension de façon à dégager une chaussée de 20 m de large.

Les nouveaux câbles sont constitués de 61 torons dont 55 torons normaux de diamètre 60 mm et 6 torons d'angle de diamètre 42 mm afin de donner la forme la plus circulaire possible aux câbles. Ils passent à l'extérieur des blocs d'ancrage existants et sont ancrés en arrière de ceux-ci sur des poutres transversales en béton précontraint.

La protection des nouveaux câbles a été notablement renforcée par rapport aux anciennes dispositions. À l'image des dispositions adoptées sur plusieurs ponts suspendus, cette protection, primordiale, est assurée par quatre barrières successives, dont un système de déshumidification permanente des câbles porteurs. Le complexe de protection est constitué par :

- la galvanisation à chaud des fils élémentaires composant les torons (400 g/m²) ;

- un enroulement par un fil galvanisé (400 g/m²) en acier doux de 3,5 mm de diamètre qui sertit les torons ;
- une gaine étanche en polyéthylène qui entoure le faisceau ;
- un système de déshumidification des câbles et des chambres d'ancrage par injection d'air sec depuis le sommet des pylônes vers les massifs d'ancrage.

Les chambres d'ancrage sont étanches à l'air et à l'eau. Chaque installation comprend un ensemble complet de déshumidification avec :

- un panneau de contrôle avec un système de circulation d'air régénéré indépendant ;
- un système de circulation d'air forcé pour le volume propre des chambres ;
- un système d'amortisseur de sur/sous-pressions.

L'installation déshumidifie l'air à l'intérieur des chambres, de même que l'air ambiant qui pénètre dans les chambres pour équilibrer les sous-pressions.

Les suspentes sont, elles, protégées par une gaine en polyéthylène haute densité, extrudée autour de la protection par couches d'apprêt et de finition.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les membres du comité technique du pont d'Aquitaine, du CETE du Sud-Ouest, de la DDE de la Gironde et du LCPC qui ont mené les expertises décrites dans cet article et plus spécialement : MM. Lafuente, Lavigne et Dourthe du LRPC de Bordeaux, M. Losset de la division Ouvrages d'art du CETE du Sud-Ouest, MM. Carracilli et Siegert du LCPC, MM. Llop et Dairaine de la DDE de la Gironde.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] GODART B., KRETZ Th., Replacement of the Suspension of the Aquitaine Bridge in Bordeaux, *ASCE Conference* **2001**.
- [2] BOIS Cl., *La problématique de l'évaluation de la capacité portante de la suspension du pont d'Aquitaine. Applications des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*, coordination Ch. CRÉMONA, AFGC, Presses de l'ENPC, **2004**.
- [3] *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art – 2^e partie, fascicule 03 : Auscultation, Surveillance renforcée, Haute surveillance, Mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde*, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement – Direction des routes, **1998**.
- [4] SHUN-ICHI-NAKAMURA, Mechanical Properties and Remaining Strength of Corroded Bridge Wires, *Structural Engineering International*, vol. 14, **1**, February **2004**.
- [5] CRÉMONA Ch., *Évaluation de la sécurité résiduelle des câbles du pont de Tancarville. Applications des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*, coordination Ch. CRÉMONA, AFGC, Presses de l'ENPC, **2004**.
- [6] LCPC, *Mesure de la tension des câbles par vibration*, Méthode d'essai des LPC, **35**, janvier **1993**.
- [7] CRÉMONA Ch., Probabilistic approach for cable residual strength assessment, *Engineering Structures*, **28**, **3**, **2003**, pp. 377-384.
- [8] CRÉMONA Ch., RASSON O., Approche probabiliste de la résistance résiduelle des câbles de suspension, *Revue française de génie civil*, **6**, **2002**, pp. 397-407.
- [9] ELACHACHI M., *Résistance résiduelle des câbles de suspension*, final report 2002C0021, **2004**.
- [10] CRÉMONA Ch., *Aptitude au service des ouvrages*, ERLPC **OA48**, LCPC, **2004**.
- [11] DANIELS H.E., The statistical theory of strengths of bundles of threads, *Proc. Roy. Soc. London*, **A 183**, **1945**, pp. 405-435.
- [12] GOURMELON J.-P., Fatigue des câbles de haubannage. Organisation et principaux résultats du programme de recherche dirigé par le LCPC, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **244-245**, mai-août, **2003**, pp. 53-71.
- [13] VIRLOGEUX M., Replacement of the suspension system of the Tancarville Bridge, *Journal of the Transportation Research Board*, Record N° **1654**, Paper N° 99-0604, National Academy Press, Washington D.C., **1999**, pp. 113-120.
- [14] BOIS Cl., LÉGER Ph., Remplacement de la suspension du pont d'Aquitaine, *Revue Travaux*, **813**, novembre **2004**.
- [15] LÉGER Ph., BOIS Cl., OURLIAC J.-P., OYARZABAL J., LLOP L., RYCKAERT J., La réparation du pont d'Aquitaine, *Revue générale des routes et aérodromes*, **787**, septembre **2000**.