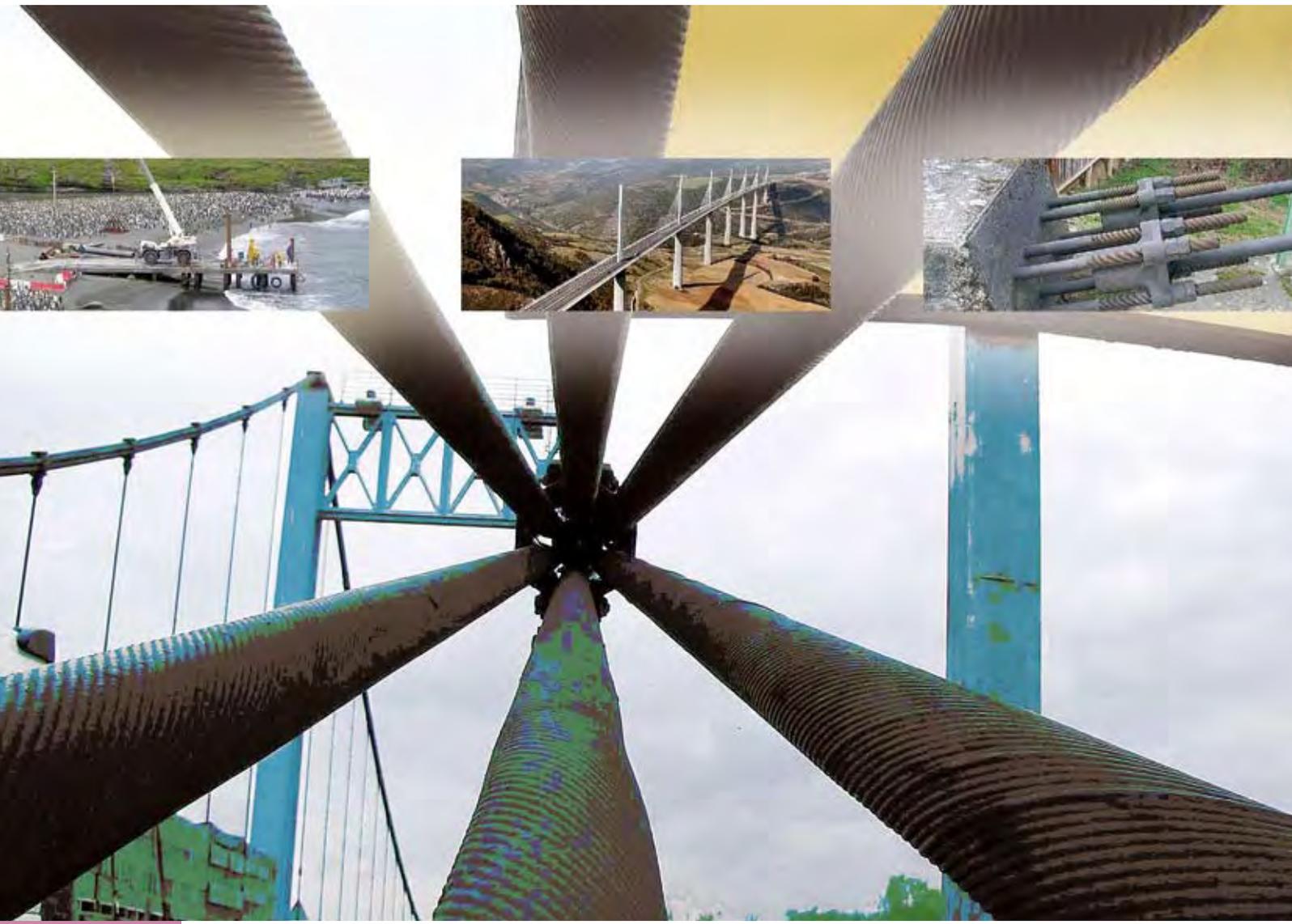


# Ouvrages d'art





# SOMMAIRE

Bulletin du Centre  
des Techniques d'Ouvrages d'Art

## *INCIDENTS, RÉPARATIONS*

### **Réhabilitation de l'appontement de Crozet par chemisage PEHD Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF)**

Hervé Barreda, Laurent Besnard,  
Philippe Delorme, Henri Gouge

☛ P. 2

### **Câbles et suspensions des ponts**

Patrick Losset

☛ P. 15

## *QUALITÉ, ORGANISATION*

### **Les ponts neufs dans des sites naturels et culturels protégés**

Émilie Luangkhot

☛ P. 32

## *INFORMATIONS BRÈVES*

### **Soutien à l'innovation routière Appel à projets d'innovation pour l'année 2009**

☛ P. 37

### **Mise en service du prototype CHAMOA**

☛ P. 38

### **Stages**

☛ P. 39

## *LE KIOSQUE DU SÉTRA*

### **Les dernières publications Ouvrages d'art**

☛ P. 40

Directeur de la publication : Philippe Redoulez. Comité de rédaction : Thierry Kretz, Emmanuel Bouchon, Angel-Luis Millan, Gilles Lacoste (Sétra), Pierre Paillusseau (CETE du Sud-Ouest), Jean-Christophe Carles (CETE Méditerranée), Bruno Godart (LCPC), Benoit Portier (DRE Paca/SMO), Jean-Loup Castellán (DIRCO/SPT/BOA). Rédacteur en chef : Nicole Cohen (Sétra) - tél : 01 46 11 31 97. Conception graphique et réalisation : Eric Rillardon (Sétra) - tél : 01 46 11 33 42. Impression : Caractère. 2, rue Monge - BP 224-15002 Aurillac Cedex - ISSN : 1266-166X - ISBN : 978-2-11-094660-7 © Sétra - 2009

# Réhabilitation de l'appontement de Crozet par chemisage PEHD

Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF)

Hervé Barreda, Laurent Besnard, Philippe Delorme, Henri Gouge

*L'article expose les actions de surveillance et de maintenance réalisées sur l'appontement de Crozet, soit :*

- *l'expertise dans un environnement hostile et isolé (3 000 km de La Réunion et uniquement accessible par voie maritime) ;*
- *et la réhabilitation par chemisage anticorrosion PEHD (polyéthylène haute densité) des nouveaux pieux-tubes métalliques.*

*La méthode de protection anticorrosion utilisée est applicable aux ouvrages dont les pieux sont fondés, en zone de déferlement de la houle, par fond meuble (plage de sable et/ou de graviers). Il s'agit d'une méthode préventive ou curative innovante et originale : simple au niveau de la mise en œuvre, efficace au niveau anticorrosion, peu onéreuse et n'ayant que très peu d'impact sur l'environnement.*

## Description et historique de l'ouvrage

1974. Construit sur l'emplacement d'un ancien appontement entièrement en bois, l'appontement actuel mesure 22,10 m de long sur 6,00 m de large. Son tablier, en béton armé (BA) de 0,45 m d'épaisseur, est équipé de 4 événements sécurisés destinés à éviter les surpressions au déferlement de la houle. Il est supporté par 18 pieux-tubes métalliques (pas d'indication sur le bétonnage, le ferrailage et l'encastrement dans le tablier).

Files 1 à 5 soit 10 pieux (2 pieux par files) de  $\phi$  406 mm et 9,52 mm d'épaisseur initiale. Files 6 et 7, soit 8 pieux (4 pieux par files) de  $\phi$  300 mm, épaisseur initiale inconnue.

Une dalle de transition en BA termine le tablier.

1988. 12 pieux (files 4, 5, 6 et 7) sont chemisés de  $\frac{1}{2}$  coquilles métalliques boulonnées de 12 mm d'épaisseur initiale.

2002 (août). 1<sup>re</sup> expertise de l'appontement réalisée par la DDE de La Réunion - Service des Ports et des Bases Aériennes. L'expertise qualitative des pieux indique des désordres notables.

2004 (août). 2<sup>e</sup> expertise, effectuée par le CETMEF. L'expertise quantitative révèle que tous les pieux sont très corrodés. Ces atteintes sont de nature à compromettre la stabilité de l'ouvrage. Le CETMEF préconise une solution de réhabilitation anticorrosive.

2005/2006 (été austral). Réalisation des travaux par l'entreprise SGTPS (Société Générale de Travaux Publics et Spéciaux) de La Réunion, titulaire du marché, notifié par l'administration des TAAF.



Photo 1 : ancien wharf entièrement en bois – Source : TAAF

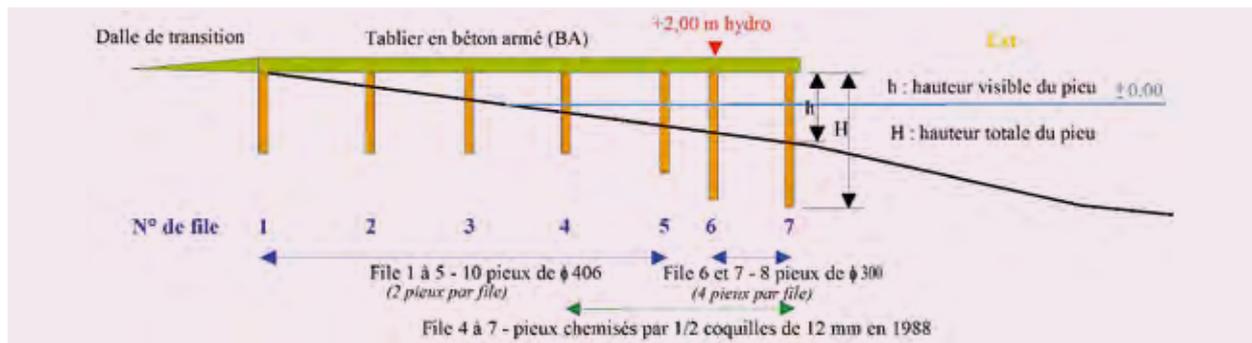


Figure 1 : élévation de l'appontement avant réhabilitation – Source : TAAF

## L'expertise

Récapitulatif des opérations menées in situ :

- inspection visuelle de l'ouvrage et relevé des désordres ;
- mesures par ultrasons des épaisseurs résiduelles des pieux ;
- bathymétrie et lançages, profil de la plage sous le tablier, composition du fond ;
- prélèvements de sol pour analyse des matériaux (granulométrie, etc.) et d'eau (résistivité) ;
- mesures des potentiels électrochimiques des pieux.

### Inspection visuelle de l'ouvrage

Après 30 années de service (1974 à 2004) le tablier a bien résisté aux actions de la houle. La sous face ne présente que peu d'oxydes de fer rouge, tout au plus quelques épaufrures sont visibles sur les faces latérales (chocs de manutention).

À l'inverse les pieux-tubes sont très affectés par la corrosion. Hors d'eau ils présentent un foisonnement généralisé. Au niveau de la zone de déferlement le métal apparaît blanc brillant. Les deux pieux de la file 5 sont complètement détruits, au niveau du sol, sur 0,40 m de hauteur.



Photo 3 : corrosion / abrasion : aspect blanc brillant du métal  
Source : CETMEF



Photo 2 : appontement avant réhabilitation – Source : CETMEF

Les pieux soumis aux courants marins, au vent, au sable en suspension et surtout au déferlement de la houle, sont l'objet de deux actions juxtaposées : corrosion et abrasion [1, 2] :

- une action électrochimique affectant toute la surface de l'acier (micro-piles de corrosion) ;
- et une action d'abrasion au déferlement par le sable en suspension. Cette action a une influence très importante sur la vitesse de corrosion par l'enlèvement continu des produits de corrosion.



Photo 4 : vu du pieu 5 Nord, complètement détruit sur 0,40 m  
Source : CETMEF

### Levés bathymétriques et lançages

Les bathymétries, situées dans l'axe de l'appontement et de part et d'autre (voir tableau 1 et figure 2 ci-après), ont été levées avec un sondeur à ultrasons. Les hauteurs d'eau sont ramenées au zéro hydrographique ( $\pm 0,00$  Hydro), le + 2,00 m étant situé sur le tablier.

Un lançage dans un sol sous marin par injection d'eau sous pression a pour but de relever : la nature du matériau traversé, son épaisseur et la côte du refus.

Il est effectué avec des tubes métalliques emboîtables à vis, un tuyau souple résistant à la pression et une moto-pompe de fort débit.

Le lançage le plus profond se situe au point d'origine du profil Sud, il est de 1,00 m. Les autres lançages ont entre 0,40 à 0,60 m de profondeur. Globalement on observe une prédominance de sable noir cru d'origine basaltique sans sédiment, ni vase et le refus n'est pas franc.

Distance (ml)	Hauteur d'eau (m)	Profondeur du lançage (m)	Nature du matériau reconnu
0,00 (About tablier)	0,70	0,40	Sable noir 0,20 puis graviers
1,00	0,80	0,40	Sable noir 0,20 puis graviers
2,50	0,90	0,60	Graviers
5,00	1,60	0,50	Graviers
10,00	2,00	0,30	Sable noir 0,20 puis graviers
15,00	2,40	0,40	Sable noir 0,20 puis graviers
20,00	2,70	0,40	Galets
25,00	3,30	0,00	Gros blocs de $\phi$ 0,50 à 1,00 m
30,00	2,90	0,40	Sable noir 0,40 puis banc rocheux
35,00	3,00	0,70	Sable noir
40,00	3,40	0,60	Sable noir

Tableau 1 : profil dans l'axe de l'appontement - Relevés bathymétriques et lançages

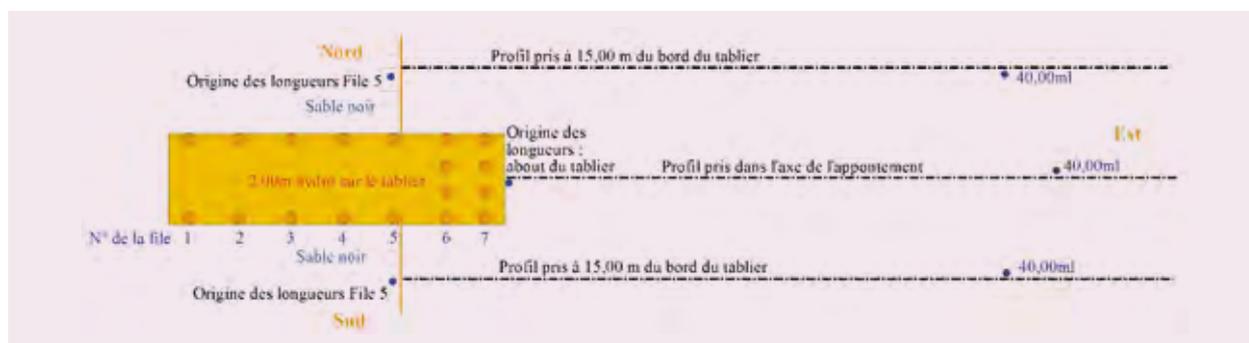


Figure 2 : vue en plan des alignements – Source : CETMEF



Photo 5 : utilisation de la lance à eau sous pression – Source : CETMEF



Photo 6 : limite de la moto-pompe : 7 bars – Source : CETMEF

## Hauteurs des pieux

La hauteur libre de pieux est mesurée depuis la sous-face du tablier jusqu'au fond résistant. Cette valeur, notée « h », est destinée à suivre l'évolution du profil de la plage sous le tablier.

Le tableau 2 montre que le profil a une tendance à l'engraissement en haut de plage et à un équilibre en bas, du côté mer. Pas de surcreusement significatif mis en évidence le jour de l'intervention.

N° de la File	H (m)	h (m)	h (m)	h (m)		h (m)	
	1974	1974	2000	2002		2004	
	Hauteur totale des pieux	Hauteur tablier/sol	Hauteur tablier/sol	Nord Hauteur tablier/sol	Sud Hauteur tablier/sol	Nord Hauteur tablier/sol	Sud Hauteur tablier/sol
1	4,25	0,90	1,00	0,30	0,45	0,23	0,23
2	4,25	1,05		0,45	0,62	0,68	0,60
3	4,25	1,20		0,93	0,99	0,92	1,40
4	4,25	1,35		1,35	1,28	1,43	1,42
5	4,75	1,50				1,72	1,90
6	4,75	1,60				2,25	2,20
7	5,05	1,75	2,80			2,58	2,60

Tableau 2 : relevé des hauteurs de pieux

## Reconnaissance du fond

Le fond, légèrement en pente d'environ (7 à 20 %), est essentiellement constitué de sable noir. À 25,00 ml on relève une zone de blocs d'enrochements de  $\phi$  0,50 m à  $\phi$  1,00 m. À 27,00 m, posé sur le sable,

un câble spécialisé du CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) est visible. A 30,00 ml, on observe un affleurement rocheux légèrement recouvert de sable noir (figure 3 et tableau 3).

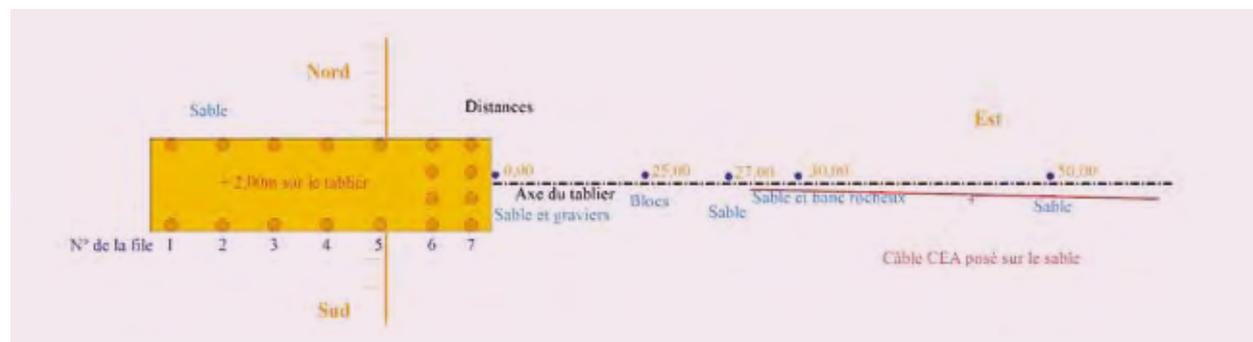


Figure 3 : reconnaissance du fond - Source : CETMEF

Distance (ml)	Hauteur d'eau (m)	Nature du fond	Géomorphologie du fond
0,00 (about du tablier)	0,70	Sable noir et graviers	Légère pente - 20 %
4,00	1,50	Graviers	Légère pente - 20 %
14,00	2,00	Sable noir et graviers	Pente douce - 12 %
25,00	3,30	Blocs de $\phi$ 0,50 à 1,00 m	Pente douce - 10 %
27,00	3,50	Vue d'un câble suivant l'axe - Sable	Pente douce - 8 %
30,00	3,60	Sable noir et banc rocheux	Pente douce - 7 %
50,00	3,80	Sable noir (jusqu'à 80,00 ml fond de sable)	Pente douce - 7 %

Tableau 3 : profil dans l'axe de l'apportement - Reconnaissance du fond

## Épaisseurs résiduelles

Les mesures d'épaisseurs de métal résiduel des pieux sont réalisées avec un mesureur à ultrasons (US) immergeable « Cygnus 1 Under Water ». Le mesureur est calibré à l'aide d'une cale étalon normalisée. La résolution de la sonde de 5 MHz de fréquence est de  $\pm 0,1$  mm et la plage de mesure est de 1 à 50 mm.

La faible hauteur visible des pieux ainsi que la gêne résultant du déferlement de la houle n'ont permis de prendre que peu de mesures d'épaisseurs résiduelles. Cependant et malgré l'échantillonnage restreint, les valeurs consignées peuvent être considérées comme représentatives de la situation et de l'état des pieux.

Rappel des caractéristiques des pieux :

- pieux des files 1 à 5 ;  $\phi$  406 mm, épaisseur initiale 9,52 mm (1974) ;
- pieux des files 6 et 7 ;  $\phi$  300 mm, épaisseur initiale inconnue (1974) ;
- pieux des files 4 à 7 ; chemisées de  $\frac{1}{2}$  coquilles, épaisseur initiale 12 mm (1988).

Vitesse de corrosion en mm/an (perte de métal/durée de service =  $V_{\text{corr}}$ , soit 7,05 mm/30 ans = 0,235) :

Les  $V_{\text{corr}}$ , issues du calcul, varient de 0,20 mm/an pour les pieux des files 1 à 4 et de 0,50 mm/an pour les chemisages. Elles sont de 2 à 5 fois supérieures à la  $V_{\text{corr}}$  moyenne observée en Méditerranée 0,12 mm/an, considérée comme étant une mer agressive (source : ROSA 2000<sup>(1)</sup>).

Perte d'épaisseur en % :

Récapitulatif des pertes d'épaisseurs des 18 pieux (voir le code couleur de la figure 4) :

- les 8 pieux des files 1 à 4 ont perdu environ 75 % de l'épaisseur initiale ;
- les 2 pieux de la file 5 ont perdu 100 % (ces 2 pieux sont détruits sur environ 0,40 m de hauteur) ;
- les  $\frac{1}{2}$  coquilles des 7 pieux des files 6 et 7 ont perdu 80 % de l'épaisseur initiale ;
- et le pieu de la file 6 placé côté Nord a perdu 100 % de l'épaisseur initial de métal (béton de remplissage très érodé palpable au niveau du fond).

Sur 18 pieux, 3 ne participent plus au fonctionnement de la structure. Précisons que les conditions de houle sévère n'ont pas permis de vérifier si d'autres pieux des files 6 et 7 sont dégradés au niveau de la fiche.

Les pieux, affectés par une  $V_{\text{corr}}$  importante, ont perdu de 75 à 100 % d'épaisseur initiale. Pour mémoire : pas d'indication précise sur le bétonnage et le ferrailage des pieux.

(1) Recommandations pour le calculs aux états limites des Ouvrages en Site Aquatique du CETMEF



Photo 7 : réalisation de mesure d'épaisseurs résiduelles – Source : CETMEF



Photo 8 : maintenance d'un container – Source : TAAF



Photo 9 : vue de la sous-face du tablier – Source : CETMEF

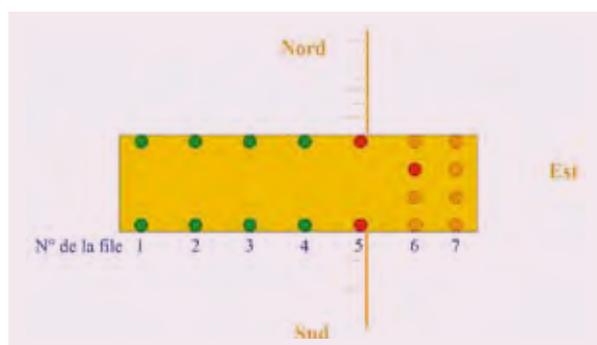


Figure 4 : perte d'épaisseur – Source : CETMEF

## Prélèvements de sol

Dans le cadre d'un projet d'extension de l'ouvrage deux prélèvements ont été réalisés, sur la plage de sable, au droit de la file 4. Un au Nord et un au Sud à 15,00 m du bord du tablier. Ils ont été identifiés et calés verticalement à bord du navire ravitailleur, puis placés dans un local climatisé dédié pour une conservation optimale avant exploitation.

Les essais effectués sur les prélèvements par le laboratoire CERM (Centre d'Etudes de Recherche et d'Essais des Matériaux) de La Réunion, ont révélé :

- analyse granulométrique. Grave sableuse d'origine basaltique 0/20 dépourvues de fines ( $< 80 \mu\text{m}$ ). Il s'agit d'un sol de classe B1 ;
- essais géotechniques (sol remanié de nature sableuse ne permettant pas de réaliser les essais de cisaillement et œdométriques). On considère que  $c$  (cohésion) égale à 0 kPa, que  $\phi$  (angle de frottement interne) est compris entre  $25^\circ$  et  $30^\circ$  et que le sol sableux est incompressible.

## Prélèvement d'eau de mer

Prélèvements effectués à - 1,00 m sous l'eau dans des bouteilles étanches et stériles. Les échantillons ont également été conservés dans le local climatisé dédié du bord.

Le traitement des échantillons (avant 24 heures) suivant la norme NF EN ISO 5667-3 n'a pu être respecté compte tenu de l'éloignement. Ils ont été analysés, environ 1 mois après, au LDEHM (Laboratoire Départemental d'Epidémiologie et d'Hygiène du Milieu) de La Réunion.

La résistivité moyenne mesurée est égale à 0,19  $\Omega$ .m. Il s'agit d'une eau de mer normale.

## Potentiels électrochimiques

Seuls les pieux constamment immergés ont été vérifiés, le voltmètre immergeable « Batycorrometer Roxby » ne fonctionnant que sous l'eau.

N° de la file	Potentiels électrochimiques (- mV Ag/AgCl/eau de mer)
5	Nord - 631, Sud - 636
6	Nord - 642, - 620, et Sud - 620, - 622
7	Nord - 646, - 649 et Sud - 642, - 646

Tableau 4 : relevés des potentiels électrochimiques

Les potentiels confirment que les pieux ne sont pas perturbés par des courants vagabonds ou d'anomalies électrochimiques. Ils sont conformes au potentiel d'abandon de l'acier en eau de mer, qui est compris entre - 550 à - 690 mV Ag/AgCl/eau de mer. Précisons que les mesures de potentiels électrochimiques à la mer sont toujours réalisées avec une électrode de référence utilisant le couple Ag/AgCl (argent/chlorure d'argent), qui vaut sensiblement à  $25^\circ + 0,252 \text{ V}$  par rapport au zéro de l'échelle électrochimique (électrode normale à hydrogène).

## Conclusion et préconisation de réhabilitation

Tous les pieux sont très affectés par la corrosion (de 75 à 100 % de perte d'épaisseur). Les désordres affectant les files 5, 6 et 7 sont de nature à compromettre la stabilité de l'ouvrage.

Les très faibles épaisseurs de métal résiduel mesurées ne peuvent être prises en compte dans les calculs de portance et de résistance des pieux.

**Il ne faudra plus charger l'about de tablier, depuis la file 5, tant que l'ouvrage n'aura pas été réhabilité.**

Il conviendra de réhabiliter l'apponnement par le remplacement de tous les pieux. **Ils seront chemisés avec du PEHD [3, 4, 5, 6, 7]** pour les préserver de la corrosion/abrasion.

Précisons qu'en configuration de déferlement, une protection cathodique par anodes sacrificielles est très difficile à mettre en œuvre pour une efficacité incertaine [8].

### Remarques concernant les caractéristiques du PEHD

#### Inconvénients

- risque de fluage dans le temps sous l'effet d'une contrainte même à température ambiante ;
- matériau dont les propriétés mécaniques se dégradent légèrement dans le temps.

#### Avantages

- bonne résistance aux contraintes chimiques, photochimiques (ultraviolets - Uv -) et thermiques, en particulier si on le compare au polychlorure de vinyle (Pvc) utilisé en chemisage de pieux-tubes (*Exemple : apponnement de l'Anse Mitant - Martinique*) ;
- inertie chimique dans l'environnement contrairement au Pvc qui, bien qu'en faible quantité, met en solution des particules de plastifiants toxiques pour le milieu ;
- faible adhérence des salissures marines, d'où une diminution du poids sur la structure ainsi que des contraintes générées par la houle au déferlement.

## La réhabilitation

L'intérêt technique tient dans l'originalité de la méthode de réhabilitation des pieux dégradés : forage du tablier au  $\phi$  des nouveaux pieux, battage, découpage du tablier en BA, recépage, chemisage anticorrosion en PEHD, injection d'un mortier de calage dans l'espace annulaire, bétonnage du pieu et du chevêtre puis enlèvement des anciens pieux.

Les TAAF (maître d'ouvrage) ont réalisé en régie la maîtrise d'œuvre de travaux et ont confié la maîtrise d'œuvre de conception (APS, DCE et marché) au bureau d'étude SOGREAH de La Réunion.

Les travaux réalisés par l'entreprise SGTPS, titulaire du marché, (annexe 2) ont duré environ 4 mois - de décembre 2005 à mars 2006 en été austral - (non compris la préparation à La Réunion : essais, matériel, matériaux, etc.).

### Les 7 contraintes

- **climatique** : environnement hostile (eau froide 2 à 3° C, vent violent et froid, pluie et neige) ;
- **éloignement** : le site est à 3 000 km de La Réunion ; Le navire ravitailleur des TAAF le « MARION DUFRESNE » effectue une rotation australe sur environ

un mois, d'où la nécessité de tout prévoir et de tout acheminer (4 rotations/an du ravitailleur) ;

- **temps** : réalisation des travaux dans l'intervalle de deux rotations, soit 4 mois ;
- **sécurité** : déchargement du matériel, des matériaux (containers, bags packs, etc.) et du ravitaillement en fonction de la portance de l'appontement ;
- **intempérie** : 50 % d'arrêt de travaux dus aux conditions météo difficiles ;
- **physique et psychologique** : sélection drastique du personnel pour prévenir les risques de défaillance de santé et d'adaptation à la vie en collectivité en condition d'isolement (~ 25 agents) ;
- **environnementale très forte** : respect du site, des végétaux, des animaux (manchots, éléphants de mer, otaries, albatros, pétrels...) et traitements des gravats et déchets (enlèvement et rapatriement).

### Contrôle du béton

Des essais de convenue de béton ont, préalablement, été réalisés en octobre 2005 à la Plaine des Cafres de La Réunion considérée comme étant le lieu se rapprochant le plus des conditions météo de Crozet.

Ces essais portant sur trois formulations, ont notamment permis de confirmer : la mise en œuvre et la résistance en compression du béton (> 35 MPa à 28 jours).



Photo 10 : carottage du tablier – Source : TAAF



Photo 11 : battage d'un nouveau pieu – Source : TAAF



Photo 12 : vue générale du chantier de battage – Source : TAAF



Photo 13 : découpage du tablier – Source : TAAF



Photo 14 : curage d'un pieu – Source : TAAF



Photo 15 : forage des scellements horizontaux – Source : TAAF

Un étalonnage de résistance en compression a été réalisé entre une presse de laboratoire et un scléromètre qui permet d'estimer sur chantier l'homogénéité et la résistance d'un béton.

Pendant la phase bétonnage à Crozet : confection d'éprouvettes ( $\phi$  16 x 32 cm), transport jusqu'à La Réunion puis écrasements en laboratoire. Les valeurs ont révélé des résistances en compression plus élevées que les valeurs attendues soit  $> 35$  MPa à 28 jours, ce qui va dans le sens de la sécurité et répond aux exigences du fascicule 65A « Exécution des ouvrages de génie civil en béton ».

### Mode opératoire de mise en œuvre

Pour remédier aux désordres observés en sous face du tablier (armatures affleurantes et tâches d'oxydes) et aux quelques éclatements d'arêtes de béton en rive, l'entreprise a réalisé :

- le piquage et le nettoyage des zones altérées (aciers corrodés et épaufures) ;
- la passivation des aciers apparents (Sika Monotop 610AC) ;
- le ragréage puis le surfacage des zones concernées avec un mortier de résine époxydique (Sika Monotop 630SR).

Pour les fondations, tous les pieux atteints, soit 18, ont été remplacés à l'avancement par 13 nouveaux pieux-tubes comme suit :

- carottage du tablier au  $\phi$  410 au droit d'un nouveau pieu (photo 10). Cette disposition sert de guide de battage ;
- battage de nouveaux pieux  $\phi$  406 épais 12,7 mm (photos 11 et 12) ;
- découpage du tablier (1,30 x 1,00) au niveau de chaque nouveau pieu (photo 13) ;
- recépage et curage des nouveaux pieux (photo 14) ;
- forage des scellements horizontaux des aciers des chevêtres dans le tablier (photo 15) ;
- mise en place du PEHD et battage d'environ 50 à 70 cm dans le sable (photo 16) ;
- ferrailage des nouveaux pieux ;
- remplissage de l'espace annulaire pieu/PEHD avec un mortier de calage à retrait compensé haute performance, épaisseur 82 mm. La protection contre la corrosion/abrasion des pieux est assurée par PEHD ( $\phi$  630 mm, épaisseur 30 mm) (photo 17) ;
- scellements des aciers HA du chevêtre identiques à l'existant dans le tablier (photo 18) ;
- mise en place du coffrage puis bétonnage du nouveau pieu et du chevêtre (photos 19 à 21) ;



Photo 16 : virole PEHD  $\phi$  630 épais 30 mm – Source : TAAF



Photo 17 : bétonnage de l'espace annulaire – Source : TAAF



Photo 18 : scellements des aciers du chevêtre – Source : TAAF



Photo 19 : positionnement du coffrage – Source : TAAF



Photo 20 : bétonnage du pieu et du chevêtre – Source : TAAF



Photo 21 : pieu et chevêtre bétonné – Source : TAAF

- suppression des ½ coquilles, découpage et enlèvement des anciens pieux (photos 22 à 24).

Équipements en place :

- 4 bollards de 5t ;
- 2 échelles en acier galvanisé, côté nord ;
- 3 défenses d'accostage (type « Arche » de 1,00 m de hauteur) visibles au niveau des 3 files 5, 6 et 7.

L'ouvrage ainsi réhabilité permet à la grue Ppm A300 de 23,80 t de déplier totalement ses extensions stabilisatrices pour manipuler en sécurité le fret maritime.

Le montant de la réhabilitation s'élève à 494 000 € HT.

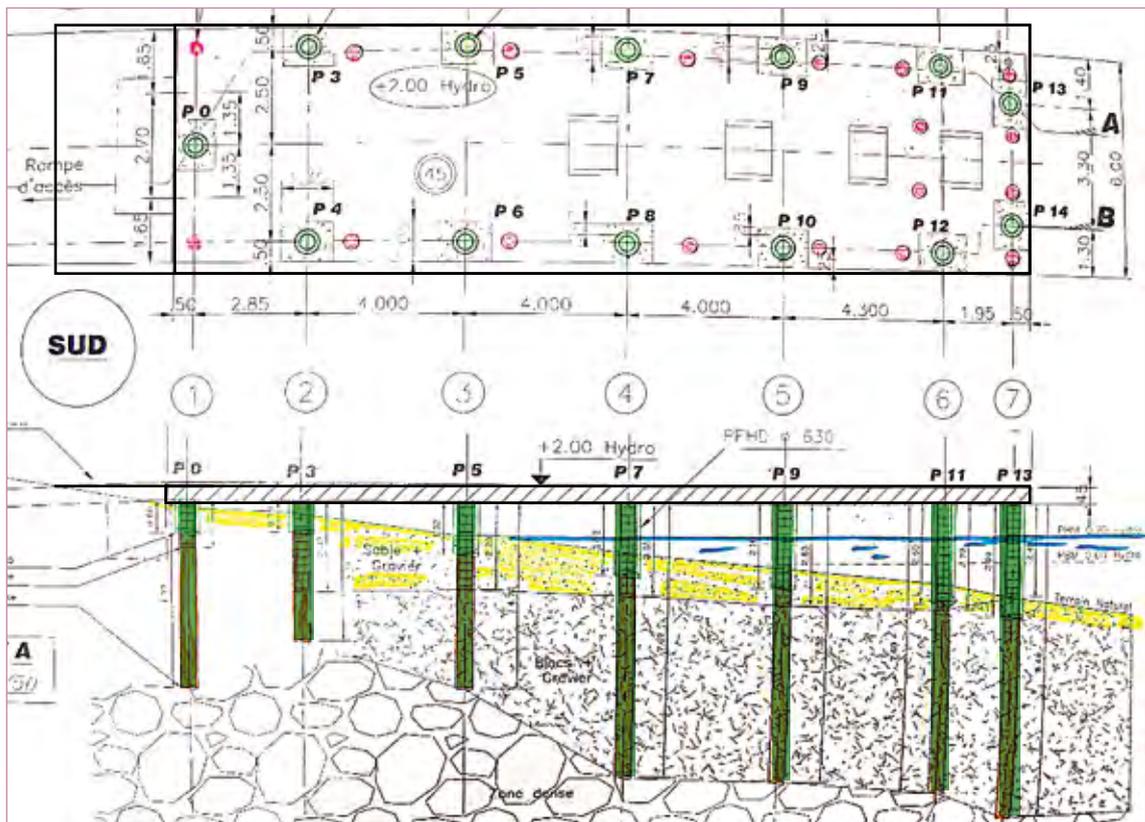


Figure 5 : implantation des 18 anciens pieux en rouge et des 13 nouveaux en vert – Source : CETMEF



Photo 22 : suppression des ½ coquilles – Source : TAAF



Photo 23 : découpage des anciens pieux – Source : TAAF



Photo 24 : découpage des anciens pieux – Source : TAAF



Photo 25 : appontement à la fin des travaux - Mars 2006

Source : TAAF



Photo 26 : appontement après environ 1 an de service - Août 2007

Source : TAAF

## Retour d'expérience

Août 2007 : après environ un an de service (mars 2006 à août 2007) le PHEHD ne présente ni altération, ni dommage visible au niveau la zone de déferlement. Les réparations effectuées sur le tablier sont en très bon état général (pas de coulure d'oxydes, ni de décollement de béton).

Le district de Crozet exercera, annuellement, une surveillance destinée à vérifier l'efficacité anticorrosive et l'usure éventuelle du PHEHD. En conséquence cette méthode assurera la pérennité de l'ouvrage.

## Conclusion et perspectives

La méthode de protection des pieux-tubes métalliques utilisant le PHEHD est innovante, originale, simple au niveau de la mise en œuvre et efficace au niveau anticorrosion. Elle peut être utilisée indifféremment : soit préventivement sur un ouvrage neuf, soit curativement sur un ouvrage en service. Elle présente aussi l'intérêt d'être peu onéreuse, peu consommatrice en matériau et en matériel et enfin elle a très peu d'impact sur l'environnement.

À noter que l'appontement de Saint Paul à La Réunion en cours de réalisation, d'une longueur de 110 m, utilise au niveau de l'enracinement sur la plage cette même technique de protection des pieux-tubes et le système duplex (chemisage PHEHD + protection cathodique) [4, 5] pour les autres pieux-tubes en pleine eau ■

## Références bibliographiques

- [1] A. Hache (1977) ; « La corrosion des métaux ». Presses Universitaires de France à Vendôme.
- [2] J. J. Lamoureux (1994) ; « Précis de corrosion ». Éditions Beauchemin, Laval - Province du Québec - Canada.
- [3] F. Lemaire (1988) ; « La protection contre la corrosion des structures métalliques immergées », Service Technique Central des Ports Maritimes et Voies Navigables. Notice STC-QG n°88-2 Compiègne.
- [4] H. Barreda, C. Hubert, C. Fardella (2002) ; « Systèmes de protection anticorrosion duplex de structures métalliques à la mer ». 2<sup>e</sup> colloque international d'Aix en P<sup>ce</sup> sur la protection cathodique et revêtements associés (juin) CEFRACOR Paris.
- [5] Label IVOR n° 02.4 (2002) ; « Procédé anticorrosion duplex par chemisage et protection cathodique de pieux-tubes métalliques ». DRAST/Mission Génie Civil/Comité Innovation Validées sur Ouvrages de Référence - Paris.
- [6] H. Barreda, R. Gallina (2004) ; « protection anticorrosion par système duplex ». VIII<sup>es</sup> Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil. Compiègne.
- [7] E. Aragon, H. Barreda, M. Eyraud, L. Pellon, F. Vacandio, N. Verrier (2006) ; « Élaboration d'une méthode d'évaluation des performances de revêtements époxydiques applicables en immersion ». 3<sup>e</sup> colloque international d'Aix en P<sup>ce</sup> sur la protection cathodique et revêtements associés. CEFRACOR Paris<sup>(2)</sup>.
- [8] H. Barreda, A. Lazzeri (1995) ; « Protection cathodique des palplanches en eau de mer : dimensionnement des anodes sacrificielles ». Bulletin de Liaison des Ponts & Chaussées (janvier) n° 195, LCPC Paris.

(2) Centre Français de l'Anticorrosion - Maison de la Chimie 28 rue Saint Dominique 75007 Paris - <http://www.cefracor.org>

## Annexe 1

### Cartes et photos



Photo 27 : plan de situation de Crozet – Source : TAAF

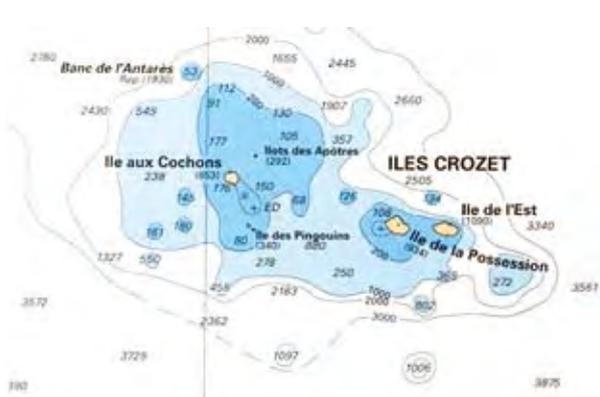


Photo 28 : l'archipel de Crozet – Source : TAAF



Photo 29 : l'île de la Possession – Source : TAAF

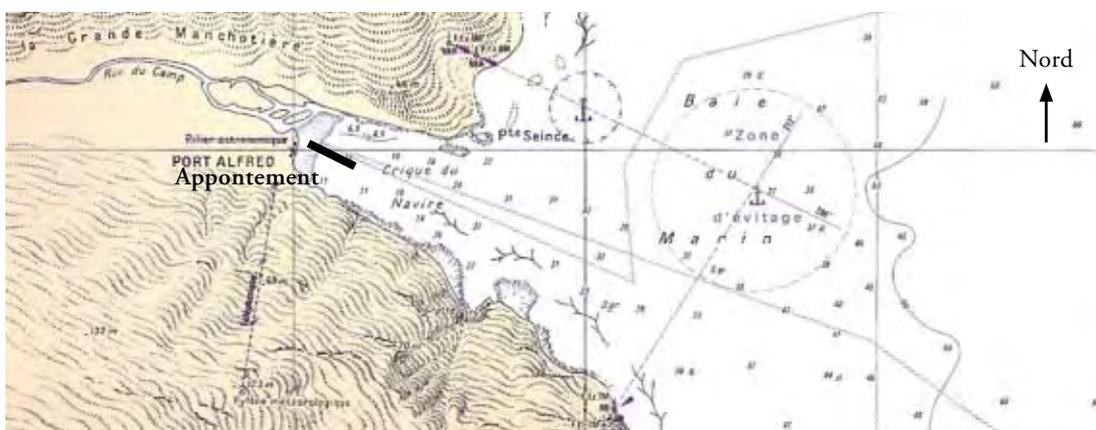


Photo 30 : port Alfred Faure dans la baie du Marin – Source : TAAF



*Photo 31 : vue générale de l'appontement avant réhabilitation. Été 2004 (hiver austral) – Source : TAAF*



*Photo 32 : vue générale des travaux de réhabilitation. Hiver 2006 (été austral) – Source : TAAF*



## Annexe 2

### Moyens en personnel, matériels et matériaux

Cinq personnes étaient présentes sur le chantier, à savoir :

- un conducteur de travaux (chef batteur) de l'entreprise SGTPS (titulaire du marché) ;
- un chef de chantier Génie Civil de l'entreprise HYDROKARST (sous-traitant) ;
- un chef d'équipe (scaphandrier, soudeur, découpeur) de SGTPS ;
- un chef d'équipe (foreur) de SGTPS ;
- un ouvrier (assistance technique) d'HYDROKARST.

Le matériel et les matériaux destinés à l'exécution des travaux, débarqués par l'entreprise depuis le « MARION DUFRESNE » étaient les suivants :

- un compresseur d'air mobile Atlas Copco XAS 125 de 11 m<sup>3</sup>/mn ;
- une glissière pneumatique de forage montée sur un chariot ;
- un marteau pneumatique de forage fond de trou,  $\phi$  70 mm ;
- une perceuse Hilti avec des accessoires et une disqueuse diamant ;
- vibreurs béton et des coffrages ; groupes électrogènes ;
- un trépideur pneumatique et un casque de battage ;
- gaz de découpage avec le matériel de découpage ;
- du matériel topographique ;
- un poste de soudure avec porte électrode, baguettes électrodes de soudage et câbles ;
- une bétonnière, brouette et benne à béton ;
- une pompe à eau et une pompe à sable ;
- petit matériel de chantier (caisse à outil, flexibles, etc.) et divers (appareil photo numérique, etc.) ;
- un stock de matériel de réparation (filtres, joints, raccords, taillants de forage, train de tige de forage, etc.) ;



Photo 34 : le « MARION DUFRESNE ». Chargement à La Réunion  
– Source : CETMEF



Photo 33 : vue du chantier – Source : TAAF

- viroles PEHD  $\phi$  630mm et 30 mm d'épaisseur ;
- ciment CEM IIA-P 42,2 N CE PM-CP2 NF, acier à béton rond lisse ou HA de  $\phi$  8 à 32 mm, granulats et sable pour confectionner le béton ;
- graisse de forage, huile pneumatique, distancier à corbeille pour le centrage des aciers, canules d'injection et évents.

Liste des engins disponibles sur Crozet appartenant aux TAAF :

- une grue PPM A 300 récente ;
- une pelle hydraulique Poclair 60P ancienne ;
- un tractopelle Caterpillar 428 D avec BRH, un godet 4 fonctions en 1 et une pelle rétro ;
- un Manitou MT 1233-S avec flèche télescopique ;
- un compacteur 900 kg vibrant ;
- une bétonnière Richier 750 H de 750 litres de capacité ;
- un bulldozer John Deere 550 ;
- un tracteur John Deere 3140 4x4 tractant une remorque Gourmelon.



Photo 35 : le Manitou MT 1233-S en action – Source : TAAF

# Câbles et suspensions des ponts

Patrick Losset

## Introduction. Position du problème

Lors du diagnostic d'un pont à câbles, la question suivante se pose systématiquement : quelle est la capacité actuelle des câbles et que doit-on en conclure sur le niveau de sécurité de l'ouvrage et les mesures d'exploitation à envisager (surveillance renforcée, limitation de charge, remplacement de suspension...).

Cette note fait une synthèse des questions qui se sont posées ces dernières années dans ce type de situation et donne les éléments de réponse, souvent partiels, qui ont été apportés. De nombreuses informations y figurant sont issues de la littérature technique et en particulier des synthèses d'études effectuées par le LCPC entre 1970 et 2000. Les références bibliographiques figurent à la fin de cette note.

L'état des câbles peut être appréhendé avec une ou plusieurs des méthodes suivantes :

- examen visuel,
- méthodes électromagnétiques d'évaluation de la corrosion et de détection des fils rompus,
- méthodes de surveillance acoustique (détection de l'onde de choc émise lors de la rupture brutale d'un fil).

Quelle que soit la méthode, il n'est donné qu'une réponse partielle concernant l'état qualitatif du câble pour les raisons suivantes :

L'examen visuel ne peut s'appliquer qu'aux fils extérieurs et les points particuliers sources de ruptures à cause des concentrations de contraintes et micro déformations (épanouissements, selles, sellettes, colliers, intérieurs des culots) sont souvent invisibles.

Les méthodes électromagnétiques ne donnent dans leur développement actuel qu'une idée qualitative approchée de l'état de dégradation d'un câble.

La surveillance acoustique détecte l'émission d'ondes de chocs consécutives aux ruptures brutales de fils. Le système n'étant jamais installé dès l'origine, il ne permet de compter des ruptures qu'à partir de son installation sur le câble déjà ancien. Elle peut aider à quantifier une évolution mais pas un état de résistance du câble.

Les ruptures suffisamment ductiles pour s'effectuer sans émission d'une onde de choc ne sont probablement pas détectées, mais on peut cependant raisonnablement estimer que les ruptures ductiles augmentent la contrainte dans les fils endommagés restants ce qui accroît le rythme des ruptures fragiles qui sont, elles, détectées par le système. Des ondes ayant d'autres origines que les ruptures de fils sont détectées et le comptage peut s'avérer délicat malgré les critères de cohérence pris en compte par le système.

Même si l'état du câble était connu de manière précise, il n'existe pas actuellement de méthode déterministe permettant de traduire l'état du câble en capacité résiduelle à la rupture.

Nous ne sommes toutefois pas totalement démunis devant le problème posé, car s'il n'existe pas à notre connaissance de critères établis pour le remplacement des câbles de ponts suspendus, d'autres utilisateurs de câbles (levagistes, transports par câbles...) se sont posé la même question et y ont apporté des réponses. Ces méthodes ne sont pas directement transposables (types de câbles, coefficients de sécurité et modes de sollicitations différents) mais il est possible de s'en inspirer. Le LCPC a effectué des études très détaillées sur les câbles démontés des ponts de Tancarville et d'Aquitaine et d'autres ouvrages, ces résultats peuvent être utilisés pour se faire une idée de l'endommagement du câble à partir des constats sur les parties visibles. Enfin, ce qui est connu du comportement des câbles endommagés peut être utilisé pour estimer sommairement la capacité résiduelle des câbles.

## Charges maximales et coefficients de sécurité

### Évaluation des charges maximales dans les câbles porteurs et suspentes

L'effort maximal dans les câbles porteurs peut généralement être évalué avec une précision de quelques pour cents par application directe de la théorie des câbles en négligeant la participation de la poutre de rigidité (hypothèse réaliste pour les cas de charge donnant la traction maximale dans les câbles porteurs). Le calcul exact nécessite d'utiliser des méthodes aux grands déplacements et prenant en compte la spécificité de comportement des câbles qui fonctionnent en traction pure. Les déformées et sollicitations ne sont plus des fonctions linéaires de chargements comme dans les structures courantes, (la raideur apparente d'un câble vis à vis des charges transversales dépend de la traction initiale dans le câble au moment de l'application de la charge).

Il convient donc d'employer des logiciels spécialisés, la modélisation comporte alors une difficulté supplémentaire qui est celle du réglage initial de la structure à vide.

Dans le cas d'un pont suspendu, sans charge d'exploitation sur le tablier et à la température de réglage, l'ouvrage doit se trouver à sa géométrie théorique de réglage, les pylônes doivent être en compression simple et les poutres de rigidités sans flexion générale.

La modélisation spatiale avec un logiciel comportant les fonctionnalités nécessaires est la méthode exacte pour obtenir l'ensemble des déformées et sollicitations correspondant aux différents chargements.

La méthode de Courbon peut aussi être employée. Cette méthode analytique aux grands déplacements donne la solution du problème au prix de quelques hypothèses simplificatrices (suspentes inextensibles, absence de charges horizontales sur les câbles comme celles induites par l'inclinaison des suspentes, inertie de flexion constante des poutres de rigidité). Elle donne d'excellents résultats dans les cas courants et a permis le dimensionnement des deux grands ponts suspendus français. Elle reste toutefois délicate à utiliser à la main et l'emploi de logiciels « maison » ou d'un tableur est recommandé. Cette méthode ne peut être employée quand l'ouvrage a une suspension mixte comportant à la fois un câble porteur et des haubans.

La charge maximale théorique dans les suspentes peut être obtenue avec la méthode de Courbon ou une modélisation avec un logiciel adapté (grands déplacements et éléments câbles). Il est d'usage depuis le début des dimensionnements de ponts suspendus de prendre en compte la rupture accidentelle d'une suspente et de vérifier qu'elle n'entraîne pas la rupture des suspentes voisines surchargées, puis la rupture en chaîne des suspentes et la chute du tablier.

Ce risque était classiquement pris en compte en dimensionnant les suspentes avec l'une des deux méthodes suivantes :

- si la charge maximale de la suspente en service est calculée avec prise en compte de l'effet de répartition apporté par les poutres de rigidité on retient un coefficient de sécurité à la rupture de 5 ;
- si la charge maximale de la suspente en service est calculée avec l'hypothèse simplificatrice d'un tablier articulé à chaque pied de suspente on retient un coefficient de sécurité à la rupture de 3.

Des calculs plus modernes ont consisté à prendre l'hypothèse d'une redistribution de la charge sur les suspentes voisines en cas de rupture accidentelle d'une suspente. On applique dans ce cas un coefficient dynamique de 2 aux charges transférées lors de la rupture. La charge maximale des suspentes voisines est alors multipliée par un coefficient de 2. On justifie les matériaux en appliquant le fascicule 61 titre V (limitation de la charge d'une suspente en câble toronné à  $0,42 \times$  force de rupture garantie).

Des calculs modernes prennent en compte en plus des états limites habituels un cas de remplacement de suspente en combinaison fréquente et un cas accidentel de rupture de suspente, toujours en combinaisons fréquentes, le transfert de charge étant pondéré par un coefficient dynamique de 1,5 à 2.

L'éventualité de rupture d'un appareil d'appui n'est pas prise en compte habituellement dans les notes de calculs. Pour certaines positions des charges d'exploitation la rupture d'un appareil d'appui peut avoir des conséquences très néfastes, le report dynamique de charge sur la première suspente peut alors dépasser sa capacité théorique. Il paraît donc nécessaire lors des diagnostics et renforcements d'ouvrages d'examiner (même si ce ne sont pas les usages actuels) la possibilité et les conséquences d'une rupture d'appui du tablier.

### Ordres de grandeur des coefficients de sécurité utilisés pour les câbles

La notion de coefficient de sécurité est variable suivant les époques les usages et les types de règlement (contrainte limite, état limite) ; les charges d'exploitation peuvent avoir des valeurs différentes et la capacité garantie des câbles peut être évaluée avec des méthodes donnant des résultats variables.

La détermination de la capacité théorique du câble peut être obtenue à partir d'une contrainte de rupture théorique, à partir d'essais sur les fils avec prise en compte ou non d'un coefficient de toronnage ou par évaluation directe à partir d'essais sur des torons.

Le tableau suivant donne des ordres de grandeur du rapport entre la rupture garantie du câble et la traction maximale non pondérée (de type ELS).

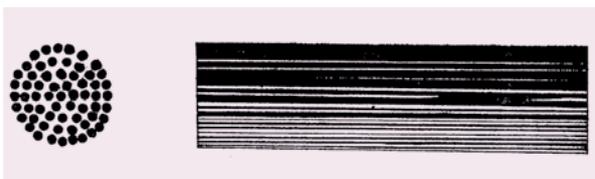
Ouvrage	Date	Contrainte de rupture	K sécurité	Observations
John A Roebling et fils	19 <sup>e</sup> et 20 <sup>e</sup>		4 à 5 except 7	
Pont du Niagara	1852		3,3	
Pont de Cincinnati	1869		2,7	
Pont de Brooklyn	1883		3,4	
Pont de Fribourg	1833		3	
Pont de Williamsburg	1903		5	
Pont d'Aramon	1900		5	
Pont de Tancarville	1959		3	
Pont de la Roche-Bernard	1961		2,5	
Pont routier sur le Forth	1964	1550	2,5	
Pont sur la Severn	1966		2,25	
Pont d'Aquitaine	1967		2,5	(en réalité 2,65 et 3,5 à vide)
StoreBelt	1998	1570	2,2	
Remplacement Aquitaine	2003	1660	2,5	
Pont de Messine	projet		2,1	(1,67 ELU)

Règlement	Date	K sécurité	Observations
Règlement 1927	1927	3	(à titre indicatif $1/2 \times$ limite élastique si limite élastique $< 2/3$ rupture)
Fascicule 61 titre V	1977	2,36	(câbles toronnés)
BS 5400		2,5	
Eurocodes et recommandation CIP haubans		2 ou 2,22	(suivant flexion d'extrémité)
Câbles porteurs téléphériques		# 3,8 à 6,3	(ELU 2,7 à 4,5)
Câbles de manutention		5	

## Différents types de câbles.

### Câbles à fils parallèles.

Ces câbles ont été les premiers utilisés sur les ponts suspendus français par les frères Seguin au début du 19<sup>e</sup> siècle. Ces câbles étaient constitués sur le chantier à partir de bobines de fil de fer. Les fils étaient ligaturés (ligatures de 20 cm espacées de 60 cm environ). En France ces câbles ont été remplacés à la fin du 19<sup>e</sup> par les câbles à torsion alternative sous l'impulsion du constructeur Ferdinand Arnodin.



Les câbles à fils parallèles ont continué à être utilisés aux États Unis puis en Europe du Nord. La technologie ayant continué à progresser. Pour les ponts à grande portée moderne le câble à fils parallèles est constitué directement sur l'ouvrage. Le mode de construction du câble doit permettre de maîtriser la géométrie finale de celui-ci et l'homogénéité de l'effort de traction dans les fils qui le constituent. Le câble est donc initialement constitué de câbles élémentaires à fils parallèles ancrés individuellement et organisés selon une distribution hexagonale. Chaque câble élémentaire est ancré par enroulement autour d'un sabot réglable fixé sur les massifs d'ancrage. Le fil d'un câble est continu, le raboutage d'une bobine de fil à l'autre se faisant par étincelage (le raboutage était initialement effectué à l'aide d'une brasure sur une coupe en sifflet). Ces câbles élémentaires sont provisoirement ligaturés afin de maîtriser la géométrie du câble lors de sa constitution, les câbles élémentaires sont constitués en couches successives selon une géométrie hexagonale comme dans le cas des faisceaux de câbles toronnés utilisés en France. Une machine spécialisée se déplaçant sur le câble effectue un compactage intense et fait pénétrer les câbles élémentaires de coin dans le faisceau, la forme finale est cylindrique. La pression interne dans le câble est maintenue par une seconde machine qui enroule un fil ou un élément profilé sous tension (Wrapping). Cette pression interne permet d'espérer bénéficier d'un ré ancrage en cas de rupture de fil. Cette pression interne doit permettre à un fil rompu de se ré ancrer aux fils voisins par frottement et à continuer à participer à la résistance du câble quand on s'éloigne de la rupture. Le câble reçoit ensuite divers dispositifs de protection étanches. Les fils sont galvanisés aux États Unis et en Angleterre depuis la première moitié du vingtième siècle. L'indice des vides de l'ordre de 25 % permet d'envisager une déshumidification du câble.

Un câble à fils parallèles moderne a un coefficient de remplissage de l'ordre de 0,75 (le maximum théorique est de 0,9) et un module de l'ordre de 200 000 MPa (proche de celui des fils constitutifs). La résistance caractéristique du câble est pratiquement égale à la somme des résistances caractéristiques des fils constitutifs.

Pour examiner le câble et surtout les fils parallèles qui le constituent il faut démonter l'enveloppe et le fil de wrapping entre deux colliers. Il est alors possible de voir les fils de la couche extérieure et de pénétrer un peu le câble en l'ouvrant avec des vérins et/ou des coins en bois.

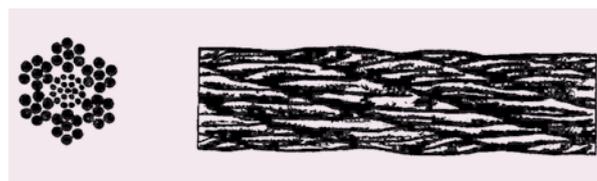
Il a été mis au point une typologie permettant de classer des niveaux de dégradation des fils sur la base de leur aspect visuel.

Des méthodes (probablement encore en partie expérimentales) ont été mises au point pour traduire ces constats en capacité résiduelle du câble et déterminent un coefficient de sécurité.

Des hypothèses d'évolution des dégradations sont prises afin de déterminer des dates probables d'atteintes de seuil de niveau de sécurité critique. Ces évaluations effectuées sur un parc d'ouvrage permettent d'établir des stratégies de remplacement de suspension ou d'installation de déshumidification.

### Câbles torsadés

Le câble torsadé inventé en première moitié du 19<sup>e</sup> siècle offre une grande souplesse, il est donc largement utilisé en levage et pour les câbles d'ascenseurs. Il a été utilisé dans les ponts pour réaliser des suspentes et des haubans pour des tabliers légers.



Le plus souvent les fils sont rassemblés en torons de 7 à 19 fils et ces torons sont câblés sur un toron central pouvant éventuellement être réalisé à partir de fibres textiles.

Le coefficient de remplissage est de l'ordre de 0,55.

Le module du câble est inférieur à 120 000 Mpa.

La résistance caractéristique du câble est pratiquement égale à 90 % de la somme des résistances caractéristiques des fils constitutifs.

### Câbles toronnés

Ces câbles sont ceux que l'on rencontre le plus souvent sur les ponts suspendus français. Ils sont réalisés par enroulement en hélice des fils autour d'une âme constituée le plus souvent d'un fil rectiligne. Chaque couche comporte 6 fils de plus que la couche précédente. Pour obtenir une sollicitation homogène des fils, ceux-ci doivent tous avoir la même longueur entre deux sections, l'angle de toronnage (angle entre le fil et l'axe du câble) doit donc être constant sur toutes les couches (habituellement 18 à 20 degrés). Le pas est donc variable d'une couche à l'autre. Le pas est inversé d'une couche à la suivante (torsion alternative) chaque couche est donc comprimée par les couches qui lui sont extérieures ce qui permet à un fil rompu de se ré ancrer par frottement et à continuer à participer à la résistance du câble dès que l'on s'éloigne de la rupture. On admet habituellement que le ré ancrage d'un fil rompu s'effectue sur la longueur d'un pas de toronnage. On nomme parfois ce phénomène effet de cordage, c'est lui qui permet de réaliser des cordes traditionnelles de grande longueur à partir de fibres végétales de quelques décimètres.



Photo 1 : câble toronné – Source : Patrick Losset (CETE du Sud-Ouest)

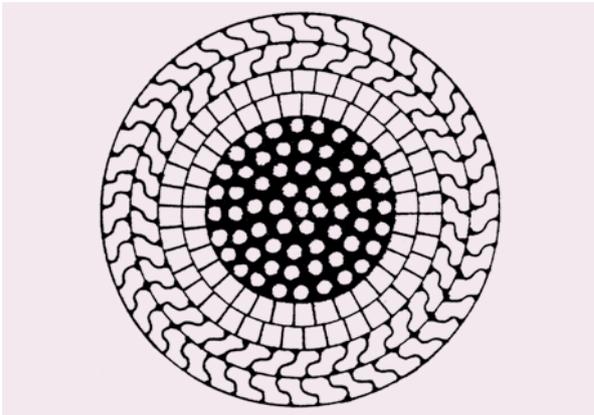


#### Structure des câbles toronnés

Nb de couches		Nb de fils de la couche	Nb de fils du câble	% couche ext	% 2 dernières couches
âme		1			
1		6	7	86%	
2		12	19	63%	95%
3		18	37	49%	81%
4		24	61	39%	69%
5		30	91	33%	59%
6	X	36	127	28%	52%
7	X	42	169	25%	46%
8	X	48	217	22%	41%
9		54	271	20%	38%
10		60	331	18%	34%

#### Câbles les plus courants X

Des câbles clos sont utilisés dans les transports par câbles et certains ponts, les couches externes (le plus souvent une ou deux) sont alors constituées de fils spécialement profilés en forme de trapèze ou de Z. Dans les ponts cette disposition a été parfois utilisée afin de créer une couche externe étanche dans l'espoir d'augmenter la durée de vie des câbles. Les câbles clos sont moins souples que les câbles constitués uniquement de fils ronds et l'on peut craindre que de l'eau pénètre à la faveur d'un écartement local des fils profilés (créé par la courbure sur une selle d'appui par exemple) et soit durablement piégée à l'intérieur du câble. Il existe des produits de remplissage pour éviter les circulations d'eau (induction de cire en sortie de chaque train de câblage par exemple).



Principe de l'utilisation de fils profilés sur les couches extérieures.

Le module du câble varie de 150 000 MPa à 175 000 MPa. Le module des fils d'acier est sensiblement pondéré par le cube du cosinus de l'angle de toronnage. Les câbles clos ont un module généralement plus élevé que les câbles constitués de fils ronds.

La résistance caractéristique du câble est pratiquement égale à 95 % de la somme des résistances caractéristiques des fils constitutifs, (ce coefficient est approximativement égal au cosinus du pas de toronnage).

Le taux de remplissage pour les câbles constitués de fils ronds est d'environ 0,75.

Les câbles clos ont un taux de remplissage variant de 0,8 à 0,9 suivant le nombre de couches de fils profilés.

Les câbles toronnés sont fabriqués à l'aide d'une câbleuse en usine. Leur utilisation dans les grands ponts est donc limitée par la capacité de transport des câbles de grandes longueurs de l'usine au chantier. Les câbles élémentaires ayant la longueur totale d'un ancrage à l'autre sont culottés en usine puis transportés sur le chantier sur des tourets en bois.

Les câbles élémentaires de 72 mm de diamètre ayant servi à la fabrication de la suspension initiale du pont

de Tancarville avaient une longueur de 1 070 m et un poids de 26,5 t (travée centrale de 608 m).

### Fils utilisés

Les fils utilisés dans les câbles de ponts ont un diamètre habituellement compris entre 4 et 5,5 mm. Le diamètre classique de 4,7 mm est largement utilisé dans les câbles toronnés des ponts français.

On demande aux fils les caractéristiques suivantes :

- des limites élastiques et résistance à la rupture élevée,
- une résistance à la torsion des fils imposée par le câblage,
- un allongement à la rupture suffisant (4 à 6 %) pour pouvoir utiliser les capacités maximales de chaque fil à la rupture du câble afin de compenser une hétérogénéité éventuelle des charges initiales des fils.

Les aciers des fils de câbles avaient initialement une faible teneur en Carbone (0,1 %) et en Manganèse (0,03 %).

Les aciers généralement utilisés pour les câbles modernes sont des aciers au carbone ( $0,55 < \% C < 0,8$ ) la teneur en manganèse est de l'ordre de 1 %.

Le fil machine est produit par laminage à chaud (diamètre de l'ordre de 10 mm).

Après traitement thermique (patentage) le fil machine est tréfilé à froid (passage du fil à travers des filières de diamètre décroissant). Ce tréfilage augmente la résistance mécanique des aciers par écrouissage et orientation des grains. Actuellement il est possible d'obtenir des résistances à la traction de l'ordre de 2 400 MPa mais il convient de limiter cette résistance à une valeur inférieure à 2 100 MPa pour que l'allongement sous charge maximale reste assez élevé (> 6 %).

Les fils profilés (fils Z par exemple) ne sont pas tréfilés mais obtenus par laminage à froid, les propriétés sont inférieures de 10 à 15 % à celles des fils ronds obtenus par tréfilage.

Les États-Unis et pays anglo-saxons utilisent des fils galvanisés depuis le début du vingtième siècle alors que la doctrine en France était jusqu'à assez récemment d'enduire les fils avec des enduits anti-oxydants à base de goudrons ou de bitumineux puis d'enduire chaque câble avec un produit du même type. Cette doctrine s'appuyait sur la réduction des caractéristiques mécaniques des fils engendrée par la galvanisation (réelle à cette époque) et sur le surcoût inutile de cette opération.

Les études effectuées en particulier par le LCPC ont montré qu'au niveau du contact elliptique entre les fils des différentes couches se développait un état de

contrainte complexe siège de micro déplacements relatifs des fils. Ces phénomènes provoquent des processus de dégradation particuliers : « fretting fatigue » et « fretting corrosion » pouvant réduire sensiblement la capacité du câble. Il a été alors démontré que le Zinc utilisé initialement pour protéger les fils des phénomènes de corrosion modifiait les conditions de contact et jouait un rôle mécanique durable de protection des fils dans ces zones critiques de frottement en petits débattements.

On utilise systématiquement en France des fils galvanisés dans les câbles de ponts suspendus depuis les années 1980. Cette disposition ne dispense pas d'utiliser une peinture souple dont le renouvellement périodique permet de conserver une galvanisation intacte.

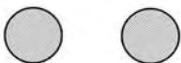
Résistance approximative des fils à la traction en fonction de l'année de construction (il s'agit des fils utilisés en France).

Année	R Mpa	Année	R Mpa
1830	600	1950	1 200
1870	700	1960	1 500 - 1 600
1880	900	1965	1 650 - 1 800
1900	1 000		

## Structure géométrique des câbles porteurs

### Torons élémentaires disposés en nappe

Les torons élémentaires sont espacés les uns des autres et disposés en une ou plusieurs nappes horizontales.



Nappe de deux torons élémentaires.



Nappe horizontale de 4 torons élémentaires.



Câble de 8 torons élémentaires disposés en 2 nappes.

Dans le cas des torons élémentaires disposés en nappes (cette option est généralement limitée à un faible nombre de torons élémentaires et donc sur les ouvrages de portée modeste), le câble est bien visible et bien ventilé à l'exception des points particuliers (selles, attaches de suspentes etc.). La rupture accidentelle d'un toron peut s'avérer très problématique, d'une part car le nombre de torons est faible, la surtension des torons restant est donc importante et d'autre part car tous les dispositifs d'attache de suspentes ne supportent pas la perte d'un toron.



Photo 2 : nappe de deux câbles – Source : Patrick Losset (CETE du Sud-Ouest)

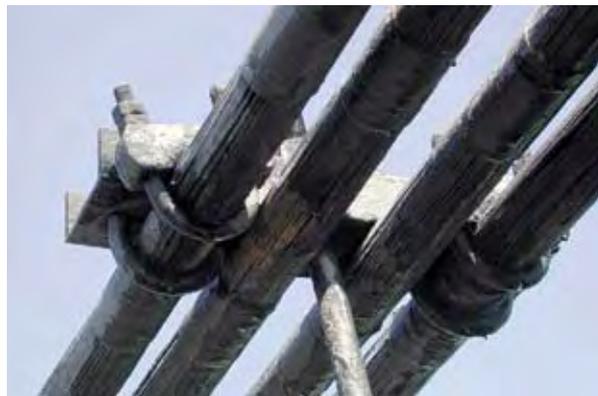


Photo 3 : disposition en nappe – Source : Patrick Losset (CETE du Sud-Ouest)

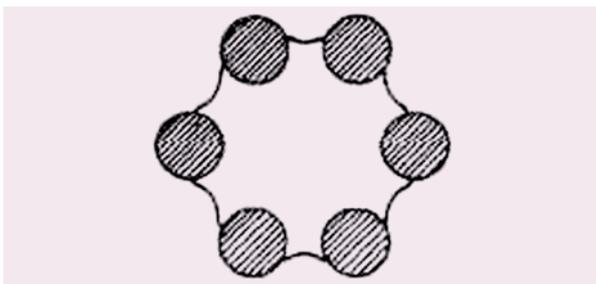


Photo 4 : nappe câbles en fils parallèles – Source : Patrick Losset (CETE du Sud-Ouest)

### Torons élémentaires disposés en couronne

Les torons élémentaires sont disposés en couronnes autour de noyaux écarteurs sur les quels ils sont serrés par les attaches de suspentes.

Si les torons élémentaires sont bien ventilés, ils sont souvent trop serrés pour permettre une bonne inspection visuelle et la remise en peinture. La complexité des attaches hautes de suspentes en fait des points singuliers au même titre que les selles organes de déviation et épanouissement.

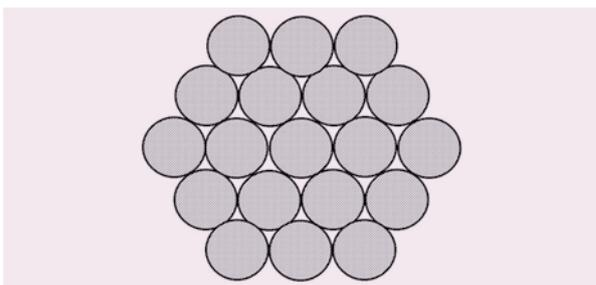


Photos 5 : disposition en couronne – Source : Patrick Losset (CETE du Sud-Ouest)

### Torons élémentaires disposés en faisceau

Lorsque le nombre de torons élémentaires augmente (il y a cependant quelques exemples à 4 et 7 torons) les câbles sont groupés en faisceau. Les torons élémentaires sont alors jointifs et disposés les uns contre les autres, ils sont disposés en couches horizontales, la forme globale étant le plus souvent hexagonale. Les torons élémentaires sont maintenus à la faveur des attaches de suspentes, des selles, des déviateurs, des sellettes d'appui, des colliers d'épanouissement etc.

Les trois faces supérieures sont enduites de mastic pour éviter la pénétration d'eau, mais les vides internes restent favorables à la migration et rétention d'eau. Les torons élémentaires internes ne sont pas visibles.



Exemple de faisceau hexagonal de 19 torons



Photo 6 : faisceau de câbles élémentaires – Source : Patrick Losset (CETE du Sud-Ouest)

## Extrémités de câbles (câbles élémentaires toronnés)

Les torons élémentaires sont ancrés individuellement par l'intermédiaire de culots permettant de transférer l'effort de traction à des barres filetées. Ces culots sont des pièces massives initialement en fonte puis en acier moulé puis le plus souvent mécano soudés pour les plus récents.

Le culottage des câbles s'effectue en plusieurs opérations successives :

- pose de ligatures sur le câble ;
- réalisation d'un « chignon » après enfilage du câble dans le culot (le chignon est réalisé en dé toronnant le câble et en bouclant les extrémités de fils (ces boucles d'extrémité ne sont pas systématiquement réalisées) ;
- le chignon est enfoncé dans son logement ;
- le culot est chauffé afin d'éviter une solidification anticipée du métal de remplissage et donc de permettre un remplissage complet du culot ;
- le culot placé rigoureusement dans l'axe du câble est ensuite rempli gravitairement de métal fondu.

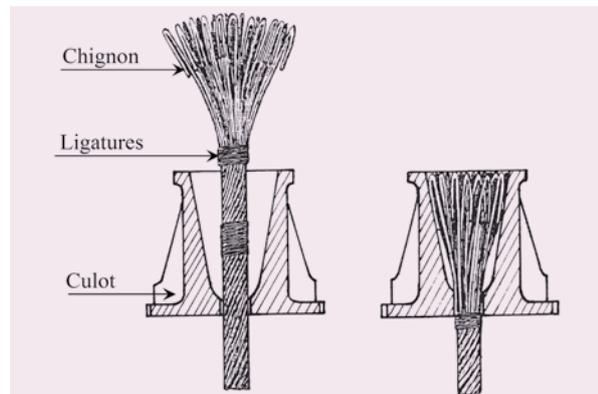
La transmission de l'effort de traction du câble au culot s'effectue par coincement conique. Un culot correctement dimensionné et réalisé est capable de transmettre 100 % de la capacité du câble.

Le métal de remplissage était initialement un alliage binaire ou un alliage ternaire actuellement le culottage s'effectue au Zinc pur à 500 degrés (pour un point de fusion à 420 degrés). On peut aussi utiliser de la résine à deux composants, cette option est obligatoire quand le câble est protégé par une gaine extrudée en PEHD.

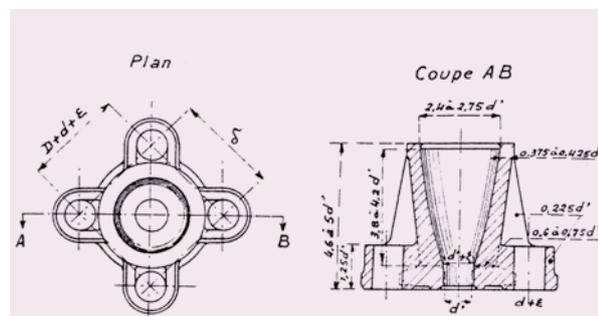
Le dessin situé à droite donne les règles de pré dimensionnement issues du cours de ponts métalliques de 1956 de M. Grelot. Il s'agit à cette époque de culots moulés.



Photo 7 : douille et cône de zinc – Source : Patrick Losset (CETE du Sud-Ouest)



Principe du culottage (il s'agit ici d'un culot moulé)



Règles de pré dimensionnement



Photos 8 : culots moulés – Source : Patrick Losset (CETE du Sud-Ouest)



Dans un culot meccano soudé on trouve la douille avec un usinage intérieur conique. Pour un remplissage au Zn la douille à une longueur d'environ  $5,25 \times$  diamètre du câble, le tronc de cône ayant une longueur de 5 diamètres, l'angle du cône est compris entre 5 et 9 degrés.

Une plaque d'appui épaisse permet de transférer l'effort de la douille aux barres d'ancrage.

Le produit servant au manchonnage (Zn ou résine) doit atteindre la partie étroite de la douille et assurer un remplissage complet, il doit apparaître en sortie de douille.

Quand les culots mécano soudés sont en position basse, la rétention d'eau au niveau de la plaque d'ancrage doit être empêchée à l'aide d'un mastic.

## Parties vulnérables d'une suspension de pont

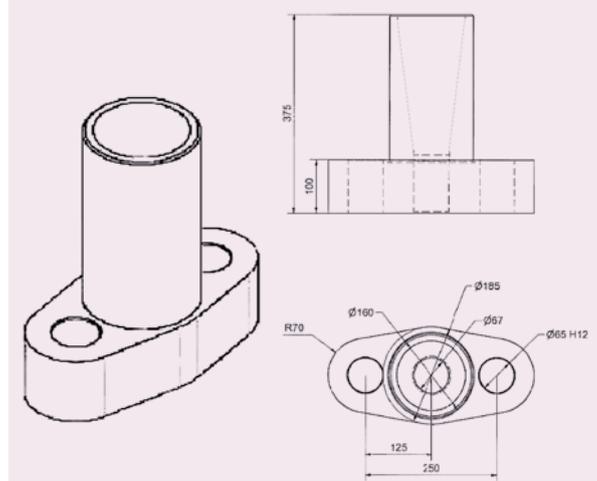
La vulnérabilité d'une suspension de pont peut être due aux sollicitations mécaniques (en prenant en compte la spécificité des zones de contact avec petits débattements : fretting fatigue), aux agents extérieurs dans les zones sensibles aux manifestations de la corrosion et bien entendu d'une manière aggravée à la superposition des deux phénomènes. Cette superposition des phénomènes de dégradation fait actuellement l'objet d'études approfondies au LCPC (fretting fatigue corrosion).

Au passage des charges mobiles la structure d'un pont suspendu s'adapte à chaque nouvelle position de la charge par grands déplacements. Le câble porteur reste un funiculaire de l'ensemble des charges qui lui sont appliquées, il a donc tendance à descendre au droit de la charge mobile et à monter ailleurs, ces déplacements sont évidemment modérés par la rigidité du tablier et par l'importance des charges permanentes par rapport aux charges variables. Ces mouvements du câble dans le plan vertical induisent de petites variations angulaires qui se concentrent sur les points fixes verticalement (selles d'appuis et sellettes de déviation) mais aussi sur les points de déviation (attaches de suspentes et colliers d'épanouissement). Il existe aussi des flexions locales parasites au niveau de certains culots d'ancrage (ancrage des câbles de retenue en cas de vibrations dues au vent ou au trafic ou attaches de suspentes mal articulées par exemple).

Les variations de contraintes locales induites provoquent dans les zones de petits débattements au niveau des contacts inter filaires des phénomènes de fretting pouvant conduire à des fissuration et ruptures de fils.



Photo 9 : culots mécano-soudés – Source : Patrick Losset (CETE du Sud-Ouest)



## Selles d'appuis sur les pylônes

On y trouve une concentration des variations angulaires, importantes en amplitudes et en nombre de cycles. Leur effet peut créer des endommagements au niveau des contacts inter filaires. Cet effet peut être amplifié par une mauvaise conception géométrique de la selle. Le câble doit s'appuyer sur un grand rayon (de l'ordre de 30 fois le diamètre du câble pouvant être réduit à 20 fois ce diamètre en cas d'interposition de Zinc sur les surfaces de contact). Le câble doit pouvoir quitter la selle en étant tangent à ce rayon quelles que soient les charges et la température ; le bord de la zone d'appui doit se terminer par un congé. Des selles trop courtes et bordées par une arrête franche peuvent provoquer des déviations angulaires concentrées en sortie de selle pour certains cas de charges. De telles dispositions sont particulièrement agressives pour le câble porteur.

Un blocage éventuel des organes de déplacement (selles sur rouleaux) peut avoir un effet agressif ; toutefois (au moins dans le cas d'ouvrages à une seule travée suspendue) la souplesse des pylônes permet le plus souvent d'assurer les déplacement de selles en service courant.

Les selles (sauf dispositions techniques malheureuses) sont peu sensibles à la corrosion classique car elles sont en point haut et souvent bien ventilées, elles peuvent par contre constituer un point d'entrée d'eau dans le câble porteur.

### Colliers d'attache de suspente

Il en existe de tous types, mais nous trouvons à la fois des rotations angulaires du câble porteur dues aux variations de l'effort dans les suspentes et des facteurs propices à la mise en flexion du câble de suspente quand les libertés de déplacement nécessaires ne sont pas assurées. On trouve souvent au niveau des attaches et colliers des dispositions géométriques favorables au développement de la corrosion (colliers serrés sur le câbles permettant la rétention d'eau par exemple).

### Sellettes de déviation et colliers d'épanouissement

Ces organes peuvent présenter les mêmes types de problèmes d'ordre mécanique que les selles d'appuis sur pylône, ceux ci peuvent être amplifiés par des rouleaux d'appuis bloqués sur des zones très rigides (à la différence des selles d'appuis sur pylônes). Ces organes sont de plus situés à des points bas de la suspension ce qui est favorable à l'alimentation et à la rétention d'eau.

Sur certains ouvrages, ils sont dans des fosses d'ancrage humides et mal ventilées ou même arrosées suite à un assainissement défaillant du tablier.

### Zones basse des câbles porteurs paraboliques

La gravité amène à cet endroit l'eau qui à réussi à pénétrer dans le câble, cette eau peut alimenter des phénomènes de corrosion.

### Culots

Les culots peuvent être le siège d'endommagements d'origine mécanique du câble. Un mauvais alignement à l'origine peut créer une forte hétérogénéité des tractions dans les fils constituant le câble (ce phénomène étant aggravé par la flexion locale des fils). Nous trouvons souvent au niveau du culot des déviations angulaires (vibration de câbles de retenue, rotation empêchée des attaches de suspentes, etc.).

Les culots hauts présentent en général un espace d'une profondeur de quelques millimètres limités par le Zinc et le bord du culot.

Rempli par l'eau de pluie ce réservoir permet d'alimenter des pénétrations d'eau à travers le culot ce qui provoque finalement une corrosion du câble.

Les culots bas (ancrages des câbles porteurs et pieds de suspentes) sont le point d'arrivée des eaux circulant sur ou dans le câble).

Le moindre défaut de remplissage en Zinc ou d'étanchéité pourra donc avoir des conséquences néfastes en permettant le développement de phénomènes de corrosion amplifiés par le fretting. Dans les culots mécano soudés, l'étanchéité de la traversée de la plaque d'appui par le câble est à traiter avec soin.

## État qualitatif du câble et surveillance

### Inspections visuelles

L'inspection visuelle reste la méthode privilégiée et indispensable d'examen du câble, elle ne doit pas être abandonnée même si l'on utilise d'autres moyens de surveillance.

Sur les câbles toronnés la rupture d'un fil de la couche extérieure se traduit par le détournement et la sortie du fil (phénomène facile à détecter) ou un glissement de part et d'autre de la rupture. Dans ce second cas il est communément admis que le fil se ré-ancre sur un pas de toronnage et le glissement du ou des fils rompus provoque une fissure de la peinture parallèle aux fils et facilement détectable à l'œil nu (l'apparition de cette fissure peut être différée dans le cas de ses peintures souples habituellement utilisées sur les câbles, ce phénomène a été constaté sur des ouvrages où l'on avait à la fois des inspections visuelles périodiques et une surveillance acoustique).

Il convient d'examiner plus particulièrement les zones et éléments signalés dans le chapitre précédent.

Seule la couche extérieure des torons élémentaires et des câbles extérieurs en cas de faisceau peut être examinée, mais dans les cas courants elle représente 20 à 30 % des fils constituant le câble élémentaire.

Des points particuliers et souvent les plus sensibles échappent partiellement ou totalement à l'examen visuel cependant une rupture à une distance centimétrique d'un bord de culot ou de collier peut être détectable. La zone observable peut être étendue par des opérations simples : démontage des capots de selles et sellettes d'appui par exemple.

Quand des ruptures de fils commencent à être constatées sur un câble, il peut être utile de démonter une suspente afin d'examiner le câble sous les attaches. En cas d'enrouillement un décapage léger permet de visualiser les zones de dissolution et les ruptures.

Les colliers d'épanouissement sont les pièces les plus difficiles à ouvrir et nécessitent l'utilisation de mordaches provisoires.

Des prélèvements de fils rompus peuvent être effectués, ils permettent d'effectuer une analyse chimique nécessaire pour évaluer la sensibilité à des phénomènes

tels que la corrosion sous tension, ils permettent aussi de constater des fissurations éventuelles et de faire un essai mécanique de traction.

Dans le cas de faisceau, il est possible après démontage d'un collier, d'écarter les torons élémentaires avec des coins de bois ou des vérins écarteurs afin de voir à l'intérieur du faisceau.

Les câbles à fils parallèles des grands ponts suspendus peuvent aussi être examinés mais l'opération nécessite l'enlèvement de la gaine extérieure du wrapping sur un intervalle ou deux intervalles avec démontage d'un collier. On force ensuite des coins de bois à l'intérieur du câble afin d'effectuer un examen visuel de l'état des fils sur une certaine profondeur.

Dans un faisceau l'écartement des deux torons peut traduire le couple de torsion apparu suite à la rupture de fils sur la couche externe de l'un d'entre eux. Un écartement systématique des torons sans détection de rupture de fil traduit la poussée consécutive à une corrosion foisonnante interne au faisceau.

### Contrôle électromagnétique des câbles de ponts suspendus

Ces méthodes s'utilisent avec des bobines électromagnétiques constituées de deux demi coques que l'on referme autour d'un toron élémentaire. Le matériel n'est pas utilisable sur les faisceaux de câbles et le passage au niveau des attaches de suspentes nécessite évidemment un démontage.

#### Détection de la corrosion

Le câble est utilisé comme noyau de la bobine fonctionnant en courant alternatif. Les courants de Foucault qui prennent naissance à la périphérie des fils mais surtout du câble élémentaire diminuent avec la corrosion qui augmente la résistance entre les fils. Cette diminution des courants de Foucault conduit à une augmentation du volume de câble magnétisé et donc de la self de la bobine.

La méthode a été calibrée et permet de donner une idée assez précise du nombre de couches oxydées et de leur taux d'oxydation.

#### Détection des fils rompus

Un défaut géométrique entraîne une distorsion des lignes de force du champ magnétique. Le bloc d'auscultation comporte donc une bobine magnétisante et deux bobines réceptrices. Cette seconde méthode a été utilisée avec des succès divers, elle est actuellement en cours de refonte et modernisation.

### État interne du câble

Des expertises très détaillées ont été effectuées au LCPC [3,4] sur les câbles déposés des ponts suspendus de Tancarville et d'Aquitaine.

On y trouve la position des câbles autopsiés dans le faisceau et le résultat de l'autopsie de chaque toron examiné.

À Tancarville les câbles étaient constitués d'un faisceau hexagonal de 60 torons de 72,3 mm constitués de 168 fils ronds de 4,7 mm câblés sur un fil d'âme de 5,8 mm.

Sur le pont d'Aquitaine chaque câble était constitué d'un faisceau hexagonal de 37 torons élémentaires de 71 mm de diamètre.

Chaque toron était un câble clos constitué de 217 fils, l'âme et les 6 premières couches étant constitués de fils ronds de 4 mm alors que les deux couches extérieures étaient constituées de 42 + 48 fils Z de 4 mm de hauteur.

Des examens fractographiques et des essais de traction sur fils ont été réalisés.

L'ensemble de ces données permet de faire des évaluations « raisonnables » des points suivants :

- état des torons internes du faisceau à partir de l'examen des torons externes,
- état des couches internes à partir de l'état de la couche visible,
- nombre de fils pré fissurés à partir du constat du nombre de fils déjà rompus,
- caractéristiques moyennes d'un fil pré fissuré et caractéristiques moyennes des fils par couche.

### Surveillance acoustique des câbles

Le LCPC a, au début des années 1970, mis au point une méthode de surveillance des câbles de pont suspendus en réponse aux besoins de surveillance des câbles du pont de Tancarville. Cette méthode communément appelée surveillance acoustique des câbles, a connu depuis de nombreuses évolutions. On utilise des capteurs disposés régulièrement sur le câble. Ces capteurs, des accéléromètres piézo-électriques, détectent l'émission des ondes de choc pouvant être produites par les ruptures fragiles de fils à l'intérieur du câble.

Le principe est le suivant : le seuil de détection est initialement placé au-dessus du bruit ambiant et évidemment au-dessous du niveau d'accélération correspondant au passage de l'onde correspondant à une rupture de fil. Une détection provoque une mise à zéro des temps et une diminution provisoire du seuil de détection sur l'ensemble des capteurs. L'événement est ensuite éventuellement classé en rupture de fils sur la base d'un certain nombre de critères de cohérence (amplitude du signal, nombre et position des capteurs ayant détecté l'événement, vitesse de propagation du signal).

Les limites du système sont les suivantes :

- l'installation est lourde et onéreuse (grand nombre de capteurs, câblage spécial),
- elle ne peut caractériser un état mais donne un rythme et l'évolution du rythme des ruptures de fils à partir de la date de son installation,
- elle ne détecte que des événements conduisant à l'émission d'une onde de choc,
- sur certains ouvrages « très bruités » un grand nombre d'évènements peut être détecté et il est parfois difficile, malgré les critères de cohérences, de séparer les signaux correspondants aux ruptures de fils.

Une nouvelle génération du système en cours de test doit pallier certaines de ces difficultés : l'ouvrage est placé dans un espace Wifi pour l'échange d'informations ce qui simplifie notablement l'installation et diminue le coût. L'image du train d'ondes correspondant à chaque événement est maintenant enregistrée ce qui doit permettre à terme d'établir un catalogue des types de signaux et permettra d'affiner le classement des événements douteux.

Ce système malgré ses limites est très utile pour assurer la surveillance d'un pont suspendu. Il devient indispensable, quand il est nécessaire de continuer à exploiter un ouvrage avec une suspension significativement dégradée et un trafic agressif (fort pourcentage de poids lourds).

## Essai d'évaluation de la capacité résiduelle d'un câble

Il est difficile de connaître l'état exact du câble en particulier le nombre de fils pré fissurés et l'endommagement des parties invisibles, mais même si l'état du câble était connu exactement, il n'existe pas actuellement de méthode reconnue permettant de traduire celui-ci en capacité résiduelle. La réduction de section (corrosion de dissolution, fils rompus) traduit aussi un endommagement invisible d'une partie des fils restant (réduction locale de section, pré fissuration) qui réduit en force et/ou allongement la capacité de certains fils paraissant encore intègres. La capacité en traction du câble diminue donc plus vite que la section de métal !

### Approche probabiliste de la résistance résiduelle des câbles de suspension

Cette recherche effectuée au LCPC sous la direction de Christian Crémona en partenariat avec l'université de Bordeaux 1 [14] développe un modèle pour l'étude de la résistance résiduelle d'un câble de pont suspendu. Elle vise à fournir des éléments d'estimation de la résistance d'un câble à partir de la description de

son état actuel, du risque de rupture d'un câble à un niveau de sollicitation imposé, et enfin de prévision de l'évolution temporelle de la résistance et du risque de rupture en tenant compte de la dégradation des fils constitutifs.

Le modèle probabiliste proposé permet de calculer la loi de probabilité de la résistance résiduelle du câble (moyenne, dispersion, probabilité de rupture) observée dans un état donné (c'est à dire constitué de plus ou moins de fils corrodés). L'introduction d'un modèle de corrosion permet d'estimer l'évolution de cette résistance au cours du temps, dans l'hypothèse favorable d'une corrosion par dissolution.

L'expérience du pont d'Aquitaine montre qu'une corrosion fissurante sous tension se développe à partir d'amorces de corrosion par dissolution et accélère nettement le processus de dégradation.

Un module de calculs réalisé par l'université de Bordeaux 1, complète ces études théoriques et expérimentales, il est proposé en utilisation libre.

### Méthode utilisée sur les suspentes des ponts japonais de Innoshima et Ohnaruto [12].

Suite à des investigations sur les suspentes des ponts de Innoshima et Ohnaruto, des réductions de section ont été constatées. Des essais de traction ont été conduits afin de traduire en réduction de capacité à la traction les réductions de section constatées sur les câbles torsadés des suspentes.

La réduction de section a été mesurée avec des méthodes magnétiques.

Câble 1 : câble CFRC (6 torons extérieurs de 19 fils et noyau de 7 torons de 7 fils.)

Câble 2 : câble torsadé constitué de 7 torons de 19 fils.

Résultats des essais: la réduction de capacité augmente 3 à 4 fois plus vite que la réduction de section d'acier.

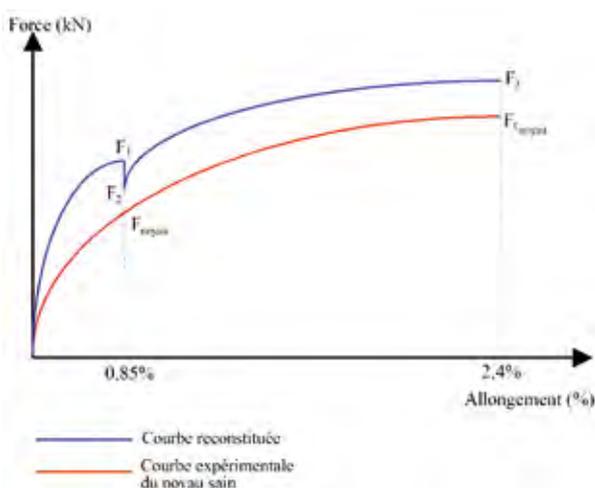
Réduction de section en %	Réduction de capacité en %	
	Câble 1	Câble 2
0	0	0
3	10	12
5	16	22
8	21	32
10	25	41
13	28	45

### Méthode développée par Pierre Brevet (Lcpc)

Cette méthode a été développée par Pierre Brevet et Laetitia Letellier, de la division MACOA (Métal, Armatures, Câbles pour Ouvrages d'Art) avec Hervé Loire (stagiaire à l'IUT de Nantes).

Cette méthode permet de tracer une courbe effort déformation « semi théorique » d'un toron élémentaire à partir d'examen visuels et de caractéristiques mécaniques des fils sains et des fils endommagés (fissurés ou présentant une corrosion locale de dissolution). La courbe ainsi établie a été comparée à la courbe réelle de comportement en traction du toron. L'étude a été faite sur les câbles du pont de Tancarville. De bonnes corrélations ont été constatées.

Le schéma suivant donne l'allure de la courbe effort/déformation du toron complet que permet d'obtenir cette approche ; (cette courbe se situe au dessus de celle correspondant au seul noyau de fils sains du toron, car elle prend en compte l'ensemble des fils jusqu'à la rupture des fils dégradés, puis les fils sains du noyau et des couches extérieures.



Les valeurs caractéristiques suivantes ont été retenues pour un fil.

Fr (fil sain) = 26 KN

F (fil sain à 0,85 % d'allongement) = 18,3 KN

Fr (fil fissuré) = 22,7 KN

Allongement à la rupture (fil fissuré) = 0,85 %

Allongement à la rupture (fil sain) = 2,4 %

F1 correspond à la charge admise par le câble lors de la rupture des fils endommagés (à 0,85 % d'allongement).

F2 correspond à la charge admise par le câble après rupture des fils endommagés.

F3 correspond à la charge de rupture finale du câble et donc de la totalité des fils sains.

La courbe inférieure représente le comportement du noyau entièrement sain.

On a donc ( en notant F la force à 0,85 % d'allongement et Fr la force à la rupture ).

$$F1 = F (\text{noyau}) + (N (\text{fils endommagés}) \times Fr (\text{fil endommagé})) + (N (\text{fils sains}) \times F (\text{fil sain à 0,85 \%}))$$

$$F2 = F (\text{noyau}) + (N (\text{fils sains}) \times Fr (\text{fil sain à 0,85 \%}))$$

$$F3 = Fr (\text{noyau}) + (N (\text{fils sains}) \times Fr (\text{fil sain}))$$

Fr noyau = N (fils noyau) x Fr (fil sain) x coefficient de toronnage (peut être pris égal à 0,88)

Cette méthode très facile à utiliser sur un tableur permet de tester de nombreux cas de distribution entre les fils rompus les fils endommagés et les fils sains. Elle a donné dans les cas où nous l'avons utilisée des estimations intermédiaires entre la simple proportionnalité avec le nombre de fils restants et les estimations japonaises pour les câbles torsadés (il faut bien entendu prendre à partir du constat visuel des hypothèses sur la réduction totale de section et le nombre de fils fissurés.

Elle permet aussi en définissant une distribution d'états de câbles élémentaires de tester facilement le risque de rupture en chaîne.

### Critères de rebut de certains types de câbles

Il n'existe pas actuellement de critères de remplacement des câbles porteurs de ponts suspendus, par contre d'autres utilisateurs ont des règles de mise au rebut. Ces règles sont liées au type d'utilisation du câble mais aussi à sa structure, elles ne peuvent donc évidemment être transposées directement.

### Câbles de levage (manuel pratique de prévention n° 18 OPPBTP et norme ISO 4309)

Le coefficient de sécurité des câbles métalliques en levage est de 5.

États entraînant la réforme immédiate :

- rupture d'un toron,
- existence d'une coque d'un nœud d'une hernie,
- réduction anormale et localisée du diamètre :
  - lorsque la diminution de diamètre du câble en un point quelconque atteint 10 % pour les câbles à torons ou 3 % pour les câbles clos ;
  - lorsque le nombre de fils cassés visibles atteint 20 % du nombre total de fils du câble sur 2 fois la longueur du pas de câblage ;

- lorsque la diminution de section d'un toron mesurée sur un pas de câblage atteint 40 % de la section totale du toron.

### Câbles de transport (téléphériques, etc.)

Un câble doit être déposé quand la réduction de section métallique du câble dépasse sur une des longueurs de référence le pourcentage de réduction de section critique R (voir tableau ci-dessous).

Dans le cas d'un câble multi torons, le câble doit aussi être déposé quand le pourcentage de réduction de section atteint le pourcentage de réduction de la section métallique R'.

On prend en compte la réduction de section due aux ruptures de fils, à l'usure, aux dégradations extérieures et intérieures. Le pourcentage est calculé en référence à la valeur initiale de la section métallique.

Un même fil n'est compté qu'une fois rompu sur la longueur de référence. Un fil ou un toron sont considérés comme rompus s'ils accusent un relâchement manifeste.

P est la longueur d'un pas de câblage.

Une rupture de fil ou une indication de corrosion sur une longueur de pas de câblage à l'extérieur d'un culot coulé est considéré comme un critère de remplacement du culot.

## Établissement d'une procédure de surveillance renforcée ou haute surveillance

L'établissement d'une telle procédure est nécessaire lorsque le constat d'endommagement des câbles, laisse penser que l'ouvrage est exploité avec un niveau de sécurité dégradé. Elle doit logiquement passer par les étapes suivantes.

### Analyse du dossier d'ouvrage et calculs complémentaires

L'objectif de ce travail est d'examiner le niveau de sécurité des câbles supposés intègres en considérant les conditions actuelles d'exploitation, il s'appuie sur un examen exhaustif du dossier d'archives.

Il est intéressant de contrôler l'effet des charges permanentes (poids réel du tablier) qui représente souvent 70 à 80 % de la charge maximale des câbles. Ceci peut être fait en prenant la pression des vérins lors d'une opération de réglage de la suspension ou en mesurant les tensions des torons élémentaires au niveau des ancrages.

Ces charges doivent éventuellement être actualisées avec les charges d'exploitation actuels. Il est intéressant de compléter cette évaluation par la quantification de l'effet théorique d'une limitation de charge à 19 t, 12 t ou 3,5 t (on utilise pour cela un ancien projet de circulaire concernant la vérification des ouvrages à portance limitée).

Le mode d'évaluation de la capacité initiale des câbles doit être examiné (a-t-on pris en compte un coefficient de toronnage, des essais à rupture ont-ils été effectués ?).

La conséquence de la rupture accidentelle d'une suspente doit être évaluée avec report dynamique ( $k = 1,5$  à  $2$ ) sur les suspentes voisines. Il est aussi conseillé d'examiner la possibilité de rupture d'un appareil d'appui et d'évaluer ses conséquences.

La conséquence de la rupture accidentelle d'un toron élémentaire d'un câble porteur doit être évaluée. Provoque t'elle des instabilités de selles sellettes et/ou d'attaches hautes de suspentes ? Quelle surtension crée t'elle dans les torons restant et quelle est la valeur résultante de leur coefficient de sécurité théorique ?

Comme dans tous les cas d'analyses sur un ouvrage ancien, il est très intéressant de faire une liste datée des interventions et travaux sur l'ouvrage et d'examiner les constats effectués lors de travaux d'entretien comme des ouvertures de colliers par exemple. Ces constats peuvent nous éclairer sur l'état réel des câbles.

Type de câble	Longueur de référence	Pourcentages de réduction de la section métallique critique
Câble clos porteur	$L = 20P$	$R = 10 \%$
	$L = 3P$	$R = 5 \%$
Câble de tension clos ou multi-torons	$L = 13P$	$R = 8 \%$
	$L = 2P$	$R = 4 \%$
Autres câbles multi-toron	$L = 165P$	$R = 25 \%$
	$L = 13P$	$R = 10 \%$
	$L = 3P$	$R = 4,5 \%$
Toron considéré isolément	$L = 2P$	$R' = 35 \%$

### État des câbles et coefficients de sécurité dégradés

Il est possible de se faire une idée de l'état du câble puis de sa capacité et d'établir donc une « estimation » (qui ne peut être qu'un ordre de grandeur) du niveau de sécurité du câble en fonction des conditions d'exploitations. Le niveau minimal admissible du coefficient de sécurité dégradé est difficile à estimer il dépend en particulier des points suivants :

- la précision d'évaluation des sollicitations (connaissance des poids, etc.) ;
- la précision de l'évaluation de la capacité dégradée du câble (connaissance du câble intègre et de son état actuel...) ;
- le niveau de dégradation du câble et l'aspect évolutif de la dégradation (il est possible dans certains cas de figer ou du moins ralentir la dégradation par des travaux de rétablissement du système anticorrosion et/ou l'ajout d'une déshumidification) ;
- les possibilités de surveillance (surveillance visuelle, période et efficacité ? ou surveillance acoustique) ;
- conséquences de la rupture accidentelle d'un toron.

### Principe d'une procédure de haute surveillance basée sur des inspections visuelles et une surveillance acoustique

La procédure intègre plusieurs niveaux successifs de réponse qui peuvent être les suivants :

- une pré alerte avant interdiction aux poids lourds provoquant une inspection visuelle, une réunion des techniciens et éventuellement investigations complémentaires ;
- une interdiction aux poids lourds. Cette mesure n'a qu'une influence modérée sur la traction maximale dans les câbles qui est théoriquement habituellement réduite de 8 à 15 % par une telle mesure. Lors du

remplacement de la suspension du pont d'Aquitaine deux phases de câbles auxiliaires ont été mises en place, chacune diminuait d'environ 10% la charge des anciens câbles. La mise en charge de la première famille n'a pas eu d'effet sensible sur le rythme de rupture de fils alors que la diminution de contrainte de 20% a pratiquement stoppé les ruptures de fils. L'interdiction des poids lourds réduit par contre considérablement les déplacements verticaux lors du passage des charges mobiles, il est donc raisonnable d'espérer que les effets des petits débattement au niveau des contacts inter filaires soient moins agressifs ;

- une pré alerte avant interdiction totale provoquant une inspection visuelle, une réunion des techniciens et éventuellement investigations complémentaires ;
- interdiction totale de la circulation.

La détermination des seuils est basée sur une analyse complète du fonctionnement de l'ouvrage et des éléments disponibles pour évaluer l'état actuel des câbles. Un ou plusieurs seuils sont fixés pour chaque niveau de pré alerte puis d'alerte sur la base des principes suivants :

- nombre de ruptures de fils sur une longueur glissante correspondant à quelques pas de toronnage. (Caractérise le risque de rupture du câble sur une longueur ne permettant pas le ré ancrage de l'effort libéré par le fil rompu) ;
- nombre de ruptures de fils sur une grande longueur de câble (caractérise l'évolution globale et régulière de l'endommagement du câble, évolution qui n'est pas forcément détectée par le critère local...) ;
- augmentation de la fréquence des ruptures sur la longueur glissante correspondant à quelques pas de toronnage. Cette fréquence est prise en compte sous forme du nombre de fils rompus sur une semaine glissante par exemple. Il est en effet raisonnable de penser que la rupture d'un toron élémentaire



Photo 10 : pont Ancenis – Source : Patrick Losset (CETE du Sud-Ouest)

endommagé et sollicité à charge constante se produit de la manière suivante : le rythme des ruptures augmente de manière exponentielle (chaque rupture accroissant la contrainte dans les fils restants, la rupture finale s'effectue par rupture quasi simultanée des derniers fils constituant 25 à 35 % du nombre initial de fils. La rupture finale intervient lorsque les derniers fils ne peuvent plus reprendre l'effort sollicitant en ajoutant leurs capacités. Les constats effectués lors de ruptures à charge constante de torons élémentaires endommagés utilisés dans les câbles de ponts suspendus laissent penser que la semaine est l'unité de temps pertinente pour détecter l'accélération des ruptures.

Le constat visuel de la rupture d'un toron doit toujours être considéré comme un signe grave dans la mesure où il peut traduire l'état général des torons et donc être le symptôme d'un câble à la limite de la rupture. Les ruptures d'un nombre significatif de fils à proximité immédiate ou à l'intérieur d'un culot doivent être considérées avec la même prudence et ceci pour les mêmes raisons ■

## Références bibliographiques

[1] Les ponts suspendus en France. LCPC - Sétra.

[2] Rapport de stage LCPC - IUT Nantes. Étude des caractéristiques résiduelles des câbles du pont de Tancarville ; H. Loire, P. Brevet, L. Letellier, 21 Février, 21 Avril 2000.

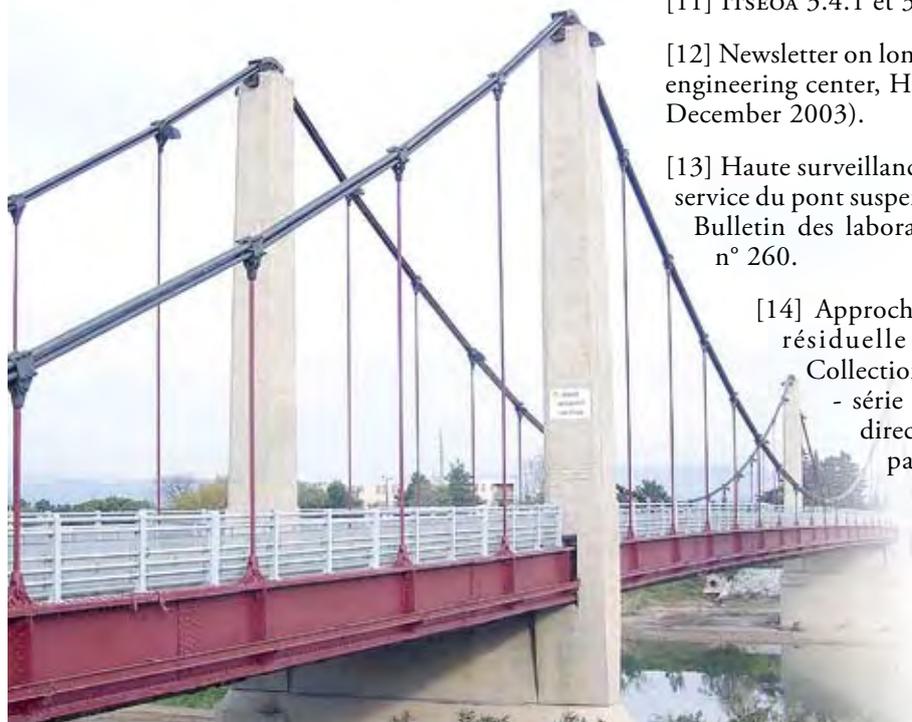


Photo 11 : pont auto ancré de Rivesaltes – Source : J. L. Boucher

[3] Compte rendu d'examen d'expertises. Torons des câbles porteurs de la suspension d'origine du pont d'Aquitaine (après dépose) ; P. Brevet, LCPC Nantes (09/02/2006).

[4] Pont de Tancarville Examen visuel de la suspension déposée LCPC Nantes ; L. Letellier, V. Gary, P. Brevet.

[5] Surveillance acoustique des câbles. Approche théorique appareillage ; J.L. Robert, D. Bruhat, J.P. Gervais, R. Laloux, N. Rumiano, M. Desmas, (bulletin de liaison des Ponts et Chaussée n° 169).

[6] Haubans recommandations de la commission interministérielle de la précontrainte. Sétra.

[7] Fatigue des câbles de haubanage. Organisation et principaux résultats du programme de recherches dirigé par le LCPC ; J.P. Gourmelon ; Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 244-245.

[8] Microstructure et propriétés mécaniques des aciers pour câble. Synthèse des travaux du LCPC. Plasticité et endommagement (1970-2000). P. Brevet, F. Olivie, J.P. Guilbaud, A. Raharinaivo ; Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 249.

[9] Microstructure et propriétés mécaniques des aciers pour câble. Synthèse des travaux du LCPC – ténacité Fissuration sous contrainte et fatigue (1970-2000), P. Brevet, A. Raharinaivo, D. Siegert ; Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 250-251.

[10] STRMTG Guide RM1.

[11] ITSEO 3.4.1 et 3.4.2.

[12] Newsletter on long-span bridge (long span bridge engineering center, Honshu-Shikoku bridge authority December 2003).

[13] Haute surveillance et évaluation de l'aptitude au service du pont suspendu d'Aquitaine. T. Kretz et al ; Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 260.

[14] Approche probabiliste de la résistance résiduelle des câbles de suspension. Collection études et recherches des LCPC - série ouvrages d'art – n° 57 sous la direction de Christian Crémona en partenariat avec l'université de Bordeaux 1.

# Les ponts neufs dans des sites naturels et culturels protégés

Émilie Luangkhot

Toute l'ambiguïté des ponts réside dans le fait qu'ils constituent à la fois une rupture artificielle dans le paysage traversé et une liaison entre deux paysages auparavant séparés. Objets façonnés par l'homme, ils marquent les paysages par leurs lignes géométriques. La rencontre entre ces lignes et les formes naturelles des sites d'implantation représente tout l'enjeu de ces constructions, et ce d'autant plus quand ces sites sont dits protégés pour leur intérêt naturel ou culturel.

## Qu'est-ce qu'un site naturel ou culturel protégé ?

Le terme de **sites naturels protégés** renvoie à plusieurs cas de figures :

- des sites protégés par une réglementation, par exemple des parcs nationaux ou des réserves naturelles ;
- des espaces protégés par des Conseils Généraux ou des conseils spécifiques tels que le Conservatoire du Littoral ou les Conservatoires régionaux d'espaces naturels ;
- des espaces soumis à une certaine obligation de résultats mais en privilégiant les moyens contractuels, tels que les sites Natura 2000.

Quant au terme de **sites culturels protégés**, il renvoie aux :

- sites classés et protégés par l'UNESCO au niveau mondial. Dans l'inventaire du patrimoine mondial sont notamment définis les paysages culturels, dont l'intérêt doit être la combinaison de la nature et de la main de l'homme ;
- sites classés au niveau national parmi les monuments naturels et sites à caractère artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque, tels que définis dans la loi du 2 mai 1930 (annulée et remplacée en 2000 par l'ordonnance n°2000-914 du 18 septembre 2000).

Avant d'être dits « classés », les sites passent par un premier niveau de protection dans lequel ils sont dits « inscrits », correspondant à la reconnaissance de leur intérêt et impliquant une vigilance particulière.

Dans tous ces sites qui constituent le patrimoine à préserver, la démarche de projet n'est généralement pas radicalement modifiée par la protection accordée au site, mais l'attention portée à l'insertion paysagère de l'ouvrage ainsi qu'à son architecture n'en sera que plus soutenue.

## L'insertion paysagère - cadre réglementaire

Les études architecturales et d'insertion paysagère permettront de faire émerger un ouvrage qui pourra devenir un créateur, un révélateur ou un observatoire du paysage, tout en préservant les qualités reconnues de ce dernier. En ce sens, différents textes réglementaires montrent la politique de l'État visant à généraliser les bonnes pratiques.

### *Loi du 10 juillet 1976 sur la protection de la Nature.*

L'article 2 exige explicitement qu'une étude d'impact soit menée dans tous projets d'infrastructures, avec une responsabilisation du maître d'ouvrage.

### *Circulaire du 24 septembre 1984 relative à la qualité paysagère et architecturale des ouvrages routiers, Direction des Routes.*

Cette circulaire met l'accent sur le fait que « les aspirations à la qualité paysagère et architecturale ne peuvent être traitées indépendamment des impératifs fonctionnels qui conditionnent les niveaux de service et de sécurité et la longévité des ouvrages ». Elle préconise une analyse de site préalable à l'élaboration d'objectifs à atteindre pour le projet, qui seront définis dès le « niveau d'avant-projet d'opérations ». Selon la catégorie de l'ouvrage concerné, ces objectifs peuvent être déclinés suivant quatre orientations :

- ouvrage destiné essentiellement à s'adapter au site existant ;
- ouvrage destiné essentiellement à s'adapter à un site futur ;
- ouvrage voué à devenir un élément dominant du site car imposé au site ;

- ouvrage sur lequel on veut délibérément attirer l'attention.

Si la collaboration avec des paysagistes, architectes ou plasticiens est mentionnée, elle n'est toutefois pas obligatoire si le chef de projet est en mesure « d'assumer seul l'esthétique de l'ouvrage ».

**Circulaire n°87-88 du 27 octobre 1987 relative aux modalités d'établissement et d'instruction des dossiers techniques concernant la construction et l'aménagement des autoroutes concédées et la Circulaire n° 94-56 du 5 mai 1994, définissant les modalités d'élaboration, d'instruction et d'approbation des opérations d'investissements sur le réseau routier national non concédé, Direction des Routes.**

Toutes deux révisées par une nouvelle circulaire sortie en janvier 2008, mais dont l'annexe ouvrages d'art est en cours de préparation, elles traitent essentiellement, dans la partie ouvrages d'art, des ouvrages non courants.

L'objectif architectural de l'ouvrage doit être proposé dès l'étude préliminaire, après recensement des contraintes du site. Dans le cas de sites culturels protégés, inscrits ou classés, il y a obligation de consulter l'Architecte des Bâtiments de France responsable du site concerné. Tous documents graphiques qui rendent compte d'une recherche architecturale entrent dans la composition du dossier d'études préliminaires.

**Circulaire n° 96-19 du 12 décembre 1995, relative à la politique « 1 % paysage et développement » sur les autoroutes et les grands itinéraires interrégionaux, Direction des Routes. Modifiée et remplacée par la circulaire du 31 mars 2005.**

Au départ, elle se concentrait plutôt sur un développement économique des zones voisines des infrastructures, sur les exemples de l'A20 et l'A75. Par la suite, les objectifs réaffirmés par la circulaire de 2005 sont de « maîtriser les effets induits par l'infrastructure tout en promouvant les valeurs naturelles, culturelles, fonctionnelles, esthétiques et émotionnelles des paysages et leur évolution qualitative ».

Pour ce faire, 1 % du montant de chaque opération est alloué par l'État afin de lancer une démarche d'analyse territoriale et paysagère et pour accompagner les actions de valorisation et développement des territoires.

## Les bonnes pratiques au sein du ministère

---

Au jour le jour, la politique décrite par ces circulaires au sein de la Direction des Routes a été en grande partie mise en place par les actions du Sétra. Dans son rôle de production et diffusion de l'état de l'art français, le Sétra a, par exemple, publié en 1969 le

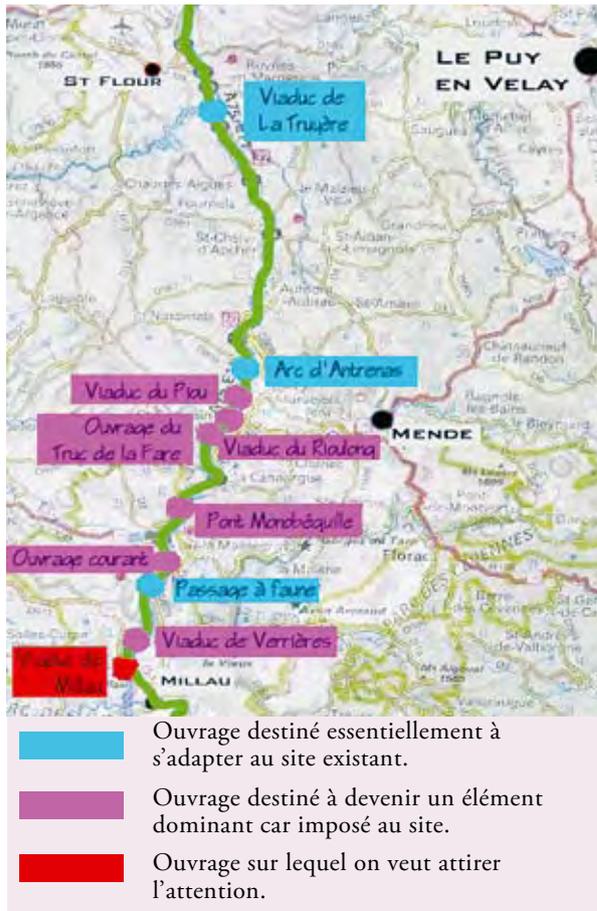
Guide d'ESThétique des Ouvrages d'Art (GUEST 69), un des rares ouvrages à donner des éléments pratiques de réflexion pour une bonne insertion paysagère des ouvrages d'art. Ainsi, depuis les années 1970, le Sétra a intégré dans sa démarche de projet des préoccupations de qualité architecturale, qui se ressentent également dans ses missions d'aide à la maîtrise d'ouvrage publique, au travers des avis et conseils sur les avant-projets et projets de tous les grands ouvrages réalisés sur le réseau national.

Néanmoins, il est à noter qu'étant donnée la durée de vie d'un pont, il s'inscrit dans un paysage où se lisent le passé et le présent, mais également l'avenir. Il peut s'avérer nécessaire, par exemple, de prévoir un doublement possible des ouvrages dès les premières études et de veiller à sa faisabilité et à son intégration dans le paysage. Le ministère de l'Équipement a encouragé ce type de démarche par le biais des palmarès des Rubans d'Or. Mis en place en 1991 par M. Christian Leyrit, directeur des Routes, ils récompensaient les meilleurs exemples d'intégration de la qualité paysagère et architecturale lors de la construction de nouvelles infrastructures routières de l'État.

Ces rubans d'or, décernés tous les 2 ans jusqu'à la dernière édition en 2002, permettaient de stimuler les bonnes initiatives et de faire connaître les bonnes pratiques. Les critères de choix développés et enrichis au fil des ans rendent compte de l'évolution des préoccupations de l'État concernant le domaine routier : aux critères de qualité paysagère, sécurité et confort se sont ajoutés les critères écologiques, qui ont abouti à la création, depuis l'édition de 1997, de la catégorie « Rubans Verts » récompensant les réalisations à caractère écologique.

L'une des autoroutes de l'État qui a reçu le plus de récompense pour ses ouvrages d'art est l'A75, « la Méridienne », qui est un véritable parcours découverte à travers le Massif Central. Les ouvrages de cette autoroute permettent d'illustrer les quatre grandes orientations explicitées dans la circulaire de la Direction des Routes du 24 septembre 1984, à l'exception de la catégorie « ouvrage destiné essentiellement à s'adapter à un site futur », qui concerne plus particulièrement des projets en milieu urbain ou péri-urbain.

Ainsi, sur une sélection d'ouvrages, je propose, à titre personnel, le classement suivant, qui ne s'appuie pas sur des orientations décrites dans les documents techniques, mais sur l'observation de ces ouvrages finis, en essayant de comprendre les intentions qui ont pu être à l'origine des choix de conception.



Une sélection d'ouvrages sur l'A75

Crédit photos : Gérard Forquet (Sétra)



Arc d'Antrenas – 1994

Ruban d'Argent 1995 catégorie « petit ouvrages d'art »

Architectes : MM. Dezeuze et Zirk

Études conception : Sétra

Études construction/réalisation : Société d'études R. Foucault et Associés

La ligne de cet ouvrage vu de loin nous fait penser que les choix de conception ont été orientés par la volonté d'adaptation au site.

Néanmoins, la forme et la couleur, dans une vue rapprochée, nous fait aussi penser que les concepteurs voulaient également attirer l'attention des automobilistes sur cet ouvrage (4<sup>e</sup> catégorie : « ouvrage sur lequel on veut délibérément attirer l'attention »).



Pont de la Truyère – 1992

Ruban d'Or 1993 catégorie « grands ouvrages d'art »

Architecte : M. Spielmann

Études : CETE Lyon avec Europe Études Gecti (EEG)

C'est la proximité de ce pont avec le viaduc de Garabit qui a conditionné les choix d'implantation et de conception pour cet ouvrage.



Viaducs du Piou et du Riulong – 1995

Architecte : M. Fraleu

Études : Europe Études Gecti (EEG)

Ces deux ouvrages, exceptions faites de leurs longueurs, sont identiques car situés à 2 km de distance sur l'itinéraire.

Malgré leurs dimensions imposantes, il nous semble que l'intégration au site est particulièrement soignée, et le traitement des piles et du tablier identique sur les deux ouvrages permettent de donner une unité à ce tronçon d'itinéraire.



**Ouvrage du Truc de la Fare – 1993**

Architecte : Cabinet Soberco

Études conception : Sétra

Études construction/réalisation : IOA

Cet ouvrage courant possède une structure aérienne, qui occupe un espace relativement important au dessus des automobilistes, démontrant une volonté de se démarquer dans un paysage relativement banal.



**Un exemple de passage à faune**

Architecte : Cabinet Marion-Holdebach

Études : ITC, Clermont-Ferrand

Cet exemple a été choisi car il nous semble particulièrement soigné.



**Pont Monobéquille de la Mothe – 1992**

Ruban d'Or 1993, catégorie « petit ouvrage d'art »

Architecte : M. Mikaelian

Études : IOA, Sétra

Cet ouvrage s'insère dans un paysage relativement banal et c'est lui qui en devient un élément marquant.



**Viaduc de Verrières – 2004**

Architecte : M. Mascarelli

Études : Sétra

Bien que dominant par ses dimensions, cet ouvrage nous semble avoir été traité de façon à être relativement discret : les piles et le tablier ont reçu un traitement soigné mais sobre.



**Un exemple d'ouvrage de franchissement courant**

Architecte : M. Lavigne

Études d'exécution : BE Ingérop, Clermont-Ferrand.

Cet ouvrage s'insère dans un paysage relativement banal et c'est lui qui en devient un élément marquant.



**Viaduc de Millau – 2005**

Architecte : Sir Norman Foster

Études conception : EEG, Foster and Partners, R. Foucault et Associés, SOGELERG

Études construction/réalisation : BE Greisch.

Cet ouvrage phare marque clairement le paysage déjà exceptionnel.

## Conclusion et perspectives

La démarche de conception de ponts neufs dans les sites naturels ou culturels protégés ne présente pas de spécificité modifiant radicalement la démarche de projet d'ouvrage d'art, si ce n'est des contraintes supplémentaires, données par le maître d'ouvrage ou l'organisme de protection. Les études se feront au cas par cas, en accordant un soin particulier aux études architecturales et d'insertion paysagère de l'ouvrage.

Il peut alors sembler étonnant que le texte le plus important concernant la qualité paysagère et architecturale des ouvrages routiers n'ait pas été révisé depuis 1984. Ce fait tient principalement à la grande ouverture du texte qui laissait toute l'initiative nécessaire pour que la collaboration entre architecte et ingénieur se fasse dans les meilleures conditions et ce, dès les études préliminaires. Dans la pratique, les démarches ont bien évolué, cherchant aujourd'hui également à intégrer les problématiques de développement durable, avec les impacts sociaux, économiques et environnementaux de plus en plus prégnants dans les projets.

Enfin, pour élargir le cadre d'une approche patrimonialiste des ponts, nous pourrions remarquer que dans la tradition française de l'aménagement urbain, les ouvrages d'art ont toujours été employés à titre monumental et artistique, avec leur propre intérêt historique et culturel qui en font des monuments à part entière, dont la préservation devient un enjeu majeur.

Ainsi, le pont comme élément perturbateur d'un patrimoine à préserver ou bien le pont comme patrimoine à part entière, sont des thèmes qui émergent et sur lesquels une forme nouvelle de collaboration nouvelle entre ingénieurs, architectes et professionnels du patrimoine mérite de se faire jour ■

## Références bibliographiques

Ouvrages d'art remarquables et leurs sites, CGPC, mai 1995.

Plaquettes « Rubans d'Or ».

« Ouvrages d'Art », revue Monuments Historiques, n° double 150/151, avril-juin 1987.

Le Paysage et la Route, document de travail de la Direction des Routes, juillet 2003.

La Nature et la Route, document de travail de la Direction des Routes, mars 2004.

## Soutien à l'innovation routière

### Appel à projets d'innovation pour l'année 2009

Dans le cadre du dispositif de soutien à l'innovation, le Sétra vient de lancer l'appel à projets 2009.

Les **trois thèmes** retenus cette année pour faire l'objet d'expérimentation d'innovations sont les suivants :

- optimisation de l'usage des réseaux périurbains,
- pérennité du patrimoine d'ouvrages d'art,
- matériaux durables.

Le **cahier des charges** est disponible sur le site : [www.marches-publics.gouv.fr](http://www.marches-publics.gouv.fr) (faire une recherche avec le mot « innovation »).

Le dossier de consultation peut également être demandé par courriel à l'adresse suivante :

[innovation-routiere.cstr.setra@developpement-durable.gouv.fr](mailto:innovation-routiere.cstr.setra@developpement-durable.gouv.fr)

Les entreprises qui souhaitent bénéficier de ce dispositif **doivent proposer** leur(s) **innovation(s)** **avant le 21 avril 2009**.

#### Le thème « Pérennité du patrimoine d'ouvrages d'art »

Au cours des années 1960, la France a mené un vaste programme de modernisation de son réseau routier, programme comprenant notamment de nombreuses constructions d'ouvrages d'art, classiques ou exceptionnels. Ce patrimoine est aujourd'hui affecté par des dégradations de différents niveaux de gravité, nécessitant une surveillance accrue et des méthodes de traitement optimisant l'usage des capacités financières des maîtres d'ouvrages.

Les recherches menées depuis quelques années ont abouti à la mise au point d'outils permettant d'établir des diagnostics précis voire des méthodes de protection ou de réparation. Pour les ouvrages en béton, ces méthodes reposant sur l'analyse de phénomènes chimiques ou électrochimiques restent encore de diffusion restreinte malgré l'étendue des besoins.

Il est maintenant recherché de nouveaux procédés permettant d'élargir la diffusion de ces méthodes et outils.

L'expérience a également montré que des dispositions nouvelles prises en compte dès la construction des ouvrages seraient de nature à faciliter les diagnostics et la maintenance ultérieurs.

Des techniques de réparation ou de confortement prolongeant sensiblement la durée de vie des ouvrages sont également recherchées.

#### Finalités

L'objectif général se décline suivant plusieurs voies de progrès :

- prendre en compte les impacts du changement climatique ;
- promouvoir de nouvelles techniques de renforcement prolongeant la durée de vie des ouvrages ;
- simplifier l'usage des méthodes et outils de diagnostic de l'état des ouvrages notamment en réduisant le nombre et la durée des inspections de suivi.

#### Domaines d'application

Les innovations attendues concernent le **diagnostic**, le **confortement** ou la **gestion** des ouvrages existants.

Pour le diagnostic, sont notamment visés :

- les ouvrages en béton armé (maladie du béton ou corrosion des armatures) ;
- les ouvrages en béton précontraint (durabilité de la précontrainte, notamment extérieure) ;
- les ouvrages bi-poutres (diagnostics de la fatigue du métal) ;
- les ouvrages à haubans ou ponts suspendus (ruptures des brins).

Les axes de progrès peuvent par exemple porter sur :

- une évaluation simple de l'étendue des réactions chimiques dégradant les bétons ;
- la détection des ruptures de brin dans les câbles ;
- la détection de la corrosion des armatures ;
- l'inspection non destructive et l'utilisation des drones ;
- dans des cas exceptionnels, des systèmes de télésurveillance en continu avec technologie sans fil.

Pour les confortements, sont notamment visés pour les ouvrages anciens :

- l'usage des matériaux composites collés ;
- les traitements électrochimiques comme la protection cathodique, la déchloruration et la réalcalinisation.

Pour la gestion, sont attendues de nouvelles méthodes de priorisation basées sur des analyses technico-économiques comme l'approche coûts-bénéfices, en y incorporant des méthodes d'analyse de risques.

## Mise en service du prototype CHAMOÀ

### Généralités

La CHAîne Algorithmique Modulaire Ouvrages d'Art (CHAMOÀ) est destinée à justifier les ouvrages courants conformément aux règles Eurocodes.

Compte tenu des fortes modifications apportées par les normes européennes, cette chaîne est entièrement nouvelle. Cette première version constitue un prototype. À ce titre elle se limite aux ouvrages les plus courants que sont les ponts cadres et portiques de type PICF et PIPO et les ponts dalles de hauteur constante de type PSIDA et PSIDP.

Elle permet de calculer les ouvrages et d'en dimensionner les éléments résistants principaux (ferraillage, précontrainte, optimisation de la géométrie des éléments de structure). Elle fournit les justifications détaillées conformes aux règles de l'Eurocode de toutes les parties de l'ouvrage. Elle ne permet pas, dans cette première version, de proposer des principes détaillés de ferraillage, ce qui fera l'objet de développements ultérieurs.

### Mode d'emploi

L'ensemble des fichiers est disponible sur le site ftp du Sétra à l'adresse <ftp.setra.fr>. Se connecter sous le login et pwd « chamoà ». Ce site contient :

- une documentation en pdf par type d'ouvrage. Elle décrit le rôle du programme, ses données, les méthodes de calculs utilisées et un fichier commenté par type d'ouvrage ;
- un exécutable permettant d'installer l'interface de saisie des données (sous Windows©) pour les 4 types d'ouvrages cités ci-dessus.

### Demande de passage Sétra

Pour faire un calcul au Sétra, l'utilisateur doit d'abord saisir ses données avec l'interface fourni puis les vérifier en éditant un rappel de celles-ci.

Lorsque le fichier de données est complet, l'utilisateur passe commande du calcul au Sétra. Le barème des prix est disponible sur le site.

Pour toute information, s'adresser à :

*Oa-type-exploitation.SETRA@developpement-durable.gouv.fr*

## Stages

### Ponts Formation Édition : la formation continue de l'École des Ponts dans le domaine des ouvrages d'art

Ponts en maçonnerie module 2 : réparer et adapter	24 au 25 mars 2009
Cycle « conduire un projet d'ouvrages d'art » module 2 : contractualiser et piloter la conception	25 au 27 mars 2009
Élargissement des ponts en maçonnerie	26 mars 2009
Cycle « Inspection des ouvrages d'art » module 2 : grands ouvrages en béton précontraint	13 mai 2009
Cycle « Inspection des ouvrages d'art » module 3 : ouvrages de soutènement non courants	26, 27 mai 2009 et le 28 1/2 journée
Cycle « Inspection des ouvrages d'art » module 4 : ouvrages métalliques et ponts à câbles	3 au 5 juin 2009
Cycle « Inspection des ouvrages d'art » module 4 : ouvrages métalliques et ponts à câbles - 1 <sup>re</sup> partie	3 juin 2009 et le 4 1/2 journée
Concevoir un système d'évacuation des eaux des ponts routiers	4 juin 2009
Prévenir les risques de réaction sulfatique interne dans les bétons	4 juin 2009 et le 5 1/2 journée
Protéger les ouvrages métalliques contre la corrosion	9 au 10 juin 2009

Renseignements et programmes détaillés des stages ENPC : tél : 01 44 58 27 28 ou site : <http://pfe.enpc.fr>  
Renseignements concernant les cycles internationaux : tél : 01 44 58 28 28 ou 28 27.

## Publications

### • Surveillance et entretien des ouvrages d'art

2<sup>e</sup> partie – Fascicule 34-2 – Ponts à haubans

#### Instruction technique

Référence : 0845 - Septembre 2008 - 46 pages - Prix de vente : 29 euros

Ce document est l'un des 21 fascicules qui composent la deuxième partie de l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art du 19 octobre 1979 révisée. Destiné par nature aux services de l'État, il s'adresse aux gestionnaires de ponts à haubans.

Il ne constitue pas un guide complet d'entretien de ce type de pont, mais doit permettre au gestionnaire de juger de l'opportunité de recourir aux différentes techniques d'auscultation et de diagnostic dans le cadre de ses missions de surveillance.

Les prescriptions de ce document pourront donc être utiles à tous les gestionnaires de ponts ou passerelles à haubans, y compris ceux qui ont en charge des patrimoines départementaux ou communaux.



### • Textes et documents techniques essentiels ouvrages d'art

Mise à jour décembre 2008

#### Répertoire

Référence : 0902w - Janvier 2009 - 98 pages

Ce document est un répertoire des textes réglementaires en vigueur et documents guides essentiels concernant la conception, l'exécution et la gestion des ponts et soutènements (y compris fondations et équipements), leurs matériaux constitutifs, ainsi que les tunnels.

Ce document est disponible en téléchargement sur les sites internet et intranet du SÉTRA :

- internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>
- i2 (réseau du Ministère) : <http://intra.setra.i2>



• **L'exploitation hivernale des ponts - Un comportement hivernal particulier, des contraintes spécifiques d'exploitation**

Note d'information n°131 - Conception Sécurité Équipement Exploitation

Référence : 0908w - Janvier 2009 - 12 pages

Destinée à l'ensemble des gestionnaires routiers concernés par la présence de ponts sur leur réseau, cette note d'information a pour objectif :

- de faire un état des lieux des connaissances, juridiques, scientifiques et techniques du fonctionnement des ponts exposés aux intempéries hivernales,
- de proposer un certain nombre de préconisations, sans toutefois viser à l'exhaustivité mais en donnant des pistes en termes de surveillance, d'organisation et de choix de traitement,

et ce afin de garantir la pérennité de l'ouvrage tout en s'assurant du bon usage des fondants routiers au regard du développement durable (sécurité des usagers, protection de l'environnement...).

Cette note n'ambitionne pas d'apporter toutes les solutions mais bien de poser les questions ainsi que de proposer des pistes de solution.

Ce document est disponible en téléchargement sur les sites internet et intranet du Sétra :

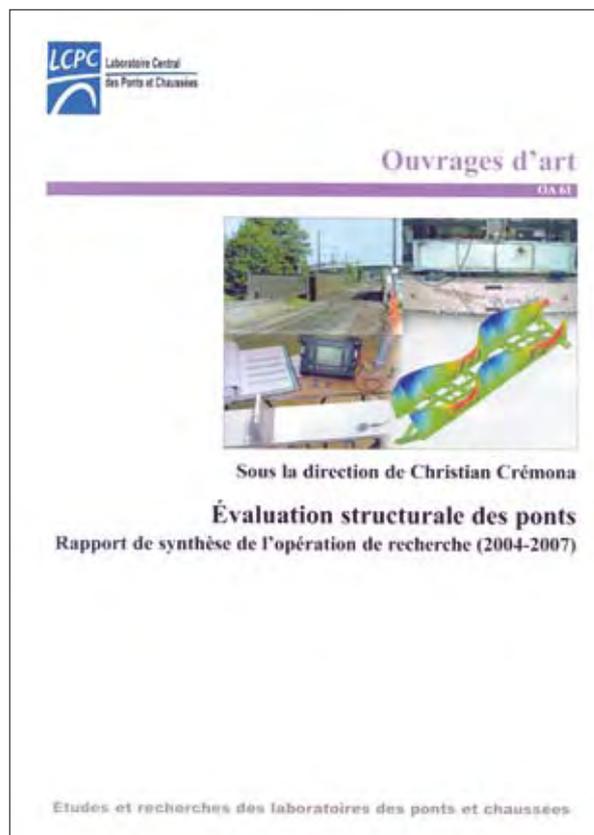
- internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>
- i2 (réseau du Ministère) : <http://intra.setra.i2>

• **Ouvrages édités par le LCPC**

Évaluation structurale des ponts - Rapport de synthèse de l'opération de recherche « sécurité structurale des ponts » (2004 - 2007)

Référence : OA 61 - Novembre 2008 - 272 pages - Prix de vente : 45 euros

Ce rapport présente les principaux résultats de l'opération de recherche « Sécurité structurale des ponts » (2004 - 2007). Les travaux menés ont eu pour finalité d'étendre la démarche basée sur la théorie de la fiabilité à l'analyse de la performance structurale en intégrant les composantes « conséquences » et « interventions ». L'opération ne s'est donc pas structurée autour de problèmes techniques, mais au travers de trois sujets d'étude transversaux identifiés parmi les étapes d'une évaluation probabiliste des risques : meilleure modélisation des incertitudes et des états limites pour des éléments dégradés, intégration d'une analyse en système dans le calcul de la probabilité de défaillance d'un ouvrage afin de mieux tenir compte des capacités de redondance, et étude des conséquences liées à la perte de performance et aide à la décision pour la détermination des interventions. Ces trois thèmes ont formé l'ossature de l'opération sous forme de trois axes d'étude. Le rapport est divisé en une introduction et douze chapitres qui illustrent les résultats obtenus sur les divers sujets de recherche. Le rapport insiste autant sur les apports théoriques et expérimentaux des études menées que sur la valorisation de certains outils informatiques.



• **Ouvrages édités par le Lcpc**

**Durabilité du béton armé et de ses constituants : maîtrise et approche performantielle**

*Référence : OA 62 - Novembre 2008 - 284 pages - Prix de vente : 45 euros*

L'opération de recherche « Durabilité du béton armé et de ses constituants : maîtrise et approche performantielle » (2001 - 2005) rassemblait différents partenaires du réseau des Lpc, des laboratoires universitaires et du privé. Les actions proposées dans cette Opération visaient à une meilleure connaissance des propriétés relatives à la durabilité du béton armé et de ses constituants, en particulier celle associée aux processus de transport dans le béton, ainsi qu'au développement d'outils pour quantifier et maîtriser cette durabilité.

Cette Opération de Recherche marque une étape originale et majeure dans l'approche de la durabilité et de la formulation des bétons, notamment par la mise au point d'une approche performantielle et prédictive de la durabilité des structures en béton armé sur la base d'indicateurs de durabilité, combinant expériences et modélisation.

Différents sujets ont été traités, tels que la modélisation de la carbonatation du béton, les spécificités des BHP, la durabilité du béton soumis au gel, ou encore le diagnostic des bétons soumis à un incendie. Les traitements électrochimiques de déchloruration du béton armé ont également été étudiés.

Cet ouvrage récapitule le contexte et les objectifs, les principaux éléments relatifs à l'organisation du projet, notamment les équipes participantes, ainsi que les différents documents et produits directs issus de l'Opération de Recherche (Partie 1 et Annexe). Cet ouvrage inclut également les actes des 2<sup>es</sup> Journées Durabilité du Réseau des Lcpc « Durabilité 2006 : Méthodes d'essais et applications » organisées en clôture de l'opération (Partie 2), ainsi que les méthodes de mesure et d'essai proposées (Partie 3).



## Coordonnées des rédacteurs

---

Hervé Barreda  
CETMEF Aix en Provence/GSMF  
Tel : 04 42 52 74 10

Laurent Besnard  
Ex Chef de district de l'archipel de Crozet  
Services techniques au siège des TAAF  
Saint Pierre de la Réunion  
Tel : 02 62 96 78 45

Philippe Delorme  
Ex Chef du Service Infrastructures des TAAF  
Conseil Général de l'Ariège  
Direction Services Techniques départementaux  
Service Bâtiments et Gestion Immobilière  
Tel : 06 30 23 55 01

Henri Gouge  
Ex Chef des Services techniques des TAAF  
DDE 13/Arrondissement aéronautique/Pôle Prospective  
production études  
Tel : 04 42 33 78 75

Patrick Losset  
CETE du Sud-Ouest/DOA  
Tel : 04 90 80 87 91

Emilie Luangkhot  
Sétra/CTOA  
Tel : 01 46 11 31 68

---

Le catalogue des publications et logiciels du Sétra est consultable sur internet et le réseau i2 du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire.

Vous y trouverez :

- les dernières parutions,
- les ouvrages disponibles, avec résumé, référence, prix de vente...,
- les modalités de commande.

Retrouver également en téléchargement (au format PDF) les numéros précédents du Bulletin Ouvrages d'art.

sur internet : <http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr>

sur i2 : <http://intra.setra.i2>





46 avenue  
Aristide Briand  
BP 100  
92225 Bagneux Cedex  
France  
téléphone :  
33 (0)1 46 11 31 31  
télécopie :  
33 (0)1 46 11 31 69  
internet : [www.setra.developpement-durable.gouv.fr](http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr)

Ce bulletin est un périodique d'information à l'intention des spécialistes d'ouvrages d'art. Il est destiné à décrire la construction d'ouvrages marquants et à faire connaître des techniques particulières ou innovantes.

Ce bulletin est consultable et téléchargeable :

- sur internet : <http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr>
- sur i2 (réseau du Ministère) : <http://intra.setra.i2>



Document disponible au bureau de vente du Sétra  
46 avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux Cedex - France  
téléphone : 33 (0)1 46 11 31 53 - télécopie : 33 (0)1 46 11 33 55  
Référence : **0913**

*Couverture - crédit photos : Patrick Losset (CETE du Sud-Ouest) ; vignettes : TAAF, Gérard Forquet (Sétra), Patrick Losset (CETE du Sud-Ouest)  
Conception graphique - mise en page : Eric Rillardon (Sétra)  
Impression : Caractère - 2, rue Monge - BP 224 - 15002 Aurillac Cedex  
L'autorisation du Sétra est indispensable pour la reproduction, même partielle, de ce document  
© 2009 Sétra - Dépôt légal : 1<sup>er</sup> trimestre 2009 - ISSN : 1266-166X - ISBN : 978-2-11-094660-7*



Ce document participe à la protection de l'environnement.  
Il est imprimé avec des encres à base végétale sur du papier écolabélisé PEFC.  
CTBA/06-00743

Le Sétra appartient  
au Réseau Scientifique  
et Technique  
du MEEDAT

