RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Cerema
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art

Fascicule 34-1 | Ponts suspendus

Mars 2021

Collection | **Références**

Collection | Références

Guide technique

Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art

Fascicule 34-1 | Ponts suspendus

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
Infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris - 77171 Sourdun
Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex

Composition du groupe de rédaction et de relecture du fascicule 34-1

- Jean-François CLÉMENT (Cerema Ouest)
- Christophe CURIT (Cerema Sud-Ouest)
- Laurent GAILLET (Université Gustave Eiffel)
- Didier GERMAIN (Cerema Centre-Est)
- Philippe GRILLAUD (Conseil Départemental 44)
- Serge HAMPARIAN (Cerema Centre-Est)
- Philippe HERROU (Conseil Départemental 35)
- Gilles LACOSTE (Cerema ITM)
- Raymond LAFUENTE (Cerema Sud-Ouest)
- Bertrand LE FORMAL (Conseil Départemental 56)
- Renaud LECONTE (Cerema Centre-Est)
- Stéphane LEFEBVRE (Conseil Départemental 49)
- Patrick LOSSET (Cerema Sud-Ouest (Animateur))
- Jean-Paul PERSY (Consultant)
- Benoît POULIN (Cerema Ouest)
- Joël RAOUL (Cerema ITM)
- Christian TESSIER (Université Gustave Eiffel)
- Gérard VIOSSANGES (Conseil Départemental 46)
- Pascal DUCHATEAU (DIR A/SIEER/OA)
- Mathieu DESPEREZ (Cerema Sud-Ouest)
- Arnaud PACITTI (Cerema Sud-Ouest)
- Bastien VAURIGAUD (Cerema Sud-Ouest)
- John DUMOULIN (Cerema Sud-Ouest)
- Guillaume ESTÈVE (Conseil Départemental 13)
- Hélène CHEMINEAU (Cerema Sud-Ouest)
- Virginie PÉRIER (Cerema Sud-Ouest)
- Daniel de MATTEIS (Cerema ITM)

Composition du comité de pilotage de l'ITSEOA

Présidents :

- Évelyne HUMBERT (MARRN)
- Emmanuel BOUCHON (MARRN)

Membres du comité :

- Jean-Michel LACOMBE (Cerema ITM)
- Jean-François DOUROUX (RATP)
- Bruno GODART (Université Gustave Eiffel)
- Philippe GUIGNARD (Conseil Général de la Gironde)
- Manuel Le MOINE (SNCF-Réseau)
- Bernard PLU (SNCF-Réseau)
- Laurent LLOP (Cerema ITM)
- Guillaume TREMBLIN (DIT/GRN/GRT)

Éléments graphiques

- Martine FERRERE (Cerema Sud-Ouest)
- You YOUTHY (Cerema Sud-Ouest)
- Denis COUSIN (Cerema ITM)
- Remi PIEDNOIR (Cerema Sud-Ouest)
- Pascal ROUSSEL (Cerema Normandie-Centre)

Nos plus vifs remerciements au réseau Ouvrages d'art des DIR, du RST et aux services techniques des collectivités locales pour les contributions à ce document.

Comment citer cet ouvrage :
Cerema. *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art - Fascicule 34-1 - Ponts suspendus - Mars 2021*. Bron : Cerema, 2021. Collection : Références. ISBN : 978-2-37180-510-1

Sommaire

Avant-propos 9

Chapitre 1 - Champ d'application 11

Chapitre 2 - Généralités 12

1 - Historique 12

1.1 - Les premiers franchissements 12

1.2 - Les premiers ponts suspendus modernes 12

1.2.1 - Les premières réalisations de l'ère industrielle 12

1.2.2 - En France – Navier – Seguin – Chaley 13

1.2.3 - Aux États-Unis, John Augustus Roebling et son fils Washington 15

1.2.4 - Les premiers accidents 16

1.3 - Le renouveau des ponts français 16

1.4 - L'effondrement du pont de Tacoma et ses conséquences 17

1.4.1 - Les causes de l'effondrement 17

1.4.2 - L' « école américaine » 17

1.4.3 - L' « école anglaise » 18

1.5 - Quelques repères historiques 18

1.6 - Les grandes portées, le domaine d'emploi actuel des ponts suspendus 19

1.7 - Histoire administrative des ponts suspendus français 20

1.8 - Les ponts suspendus en France 21

2 - Différents types de ponts à câbles 21

2.1 - Les ponts haubanés 22

2.2 - Les ponts suspendus : association d'un câble porteur et d'une poutre fléchie 22

2.3 - Utilisation simultanée d'un câble porteur (dit parabolique) et de haubans : les suspensions hybrides 25

2.4 - Le pont Gisclard 27

2.5 - Le pont « liane » ou « ribbon bridge » 28

3 - Méthodes de construction 28

3.1 - La mise en place des câbles porteurs 28

3.1.1 - Câbles à fils parallèles de la première génération 29

3.1.2 - Câbles à fils parallèles modernes 29

3.1.3 - Câbles constitués de nappes ou de couronnes de torons élémentaires 30

3.1.4 - Câbles constitués de faisceaux 30

3.2 - Équilibre du câble seul 31

3.3 - Équilibre du câble chargé par le poids du tablier 32

3.4 - Les mouvements de selles 32

4 - Modes de fonctionnement 32

4.1 - Comparaison du fonctionnement du câble hauban et du câble porteur parabolique 32

4.1.1 - Le câble hauban 32

4.1.2 - Le câble porteur (parabolique) 33

4.1.3 - Comparaison du hauban et du câble porteur parabolique 34

4.2 - Fonctionnement d'un pont suspendu classique : association d'une poutre rigide en flexion et d'un câble porteur 34
4.2.1 - Ouvrage à vide à la température de réglage 34
4.2.2 - Charge de la totalité de la travée avec les charges variables 34
4.2.3 - Charge partielle de la travée avec les charges variables 35
4.2.4 - Possibilité d'ajustement de la souplesse inhérente au principe de suspension 35
4.3 - Travées multiples, pylônes massifs et câbles de tête 36
4.3.1 - Utilisation de pylônes massifs 36
4.3.2 - Utilisation de câbles de tête 37
4.4 - Conséquences du fonctionnement spécifique des ponts suspendus sur les calculs structurels 38
5 - Appuis : piles, culées, massifs et chambres d'ancrage 38
5.1 - Ancrage sur pylônes massifs 38
5.2 - Ancrage sur massifs poids 39
5.3 - Utilisation d'une butée sur la fondation du pylône 40
5.4 - Ancrage direct dans le rocher 41
5.5 - Utilisation de tirants dans le sol 41
5.6 - Fixations des barres d'ancrage au massif 42
6 - Suspensions 43
6.1 - Colliers d'épanouissement 44
6.2 - Appuis du câble porteur : selles et sellettes 44
6.3 - Ancrages et organes d'attache des extrémités de câbles porteurs et suspentes en câbles 46
6.4 - Les barres et étriers d'ancrage – matériaux et filetage 47
7 - Pylônes 48
7.1 - Les différents types de pylône 48
7.2 - Les matériaux utilisés 50
7.2.1 - La maçonnerie 50
7.2.2 - Le béton armé 51
8 - Tabliers 51
9 - Appareils d'appui 52
10 - Protection anticorrosion des suspensions 54
10.1 - Éléments généraux 54
10.2 - Évolution de la réglementation et des techniques 55
10.3 - Déshumidification des câbles 55
Chapitre 3 - Notions sur la nature des défauts et des désordres 57
1 - Piles, culées et massifs d'ancrage 57
2 - Pylônes 57
3 - Suspensions 57
3.1 - Câbles 57
3.1.1 - Défauts possibles sur le fil tréfilé 58
3.1.2 - Fils galvanisés ou fils « clairs » 58
3.1.3 - Géométrie des fils 58
3.1.4 - Constitution des torons élémentaires à partir des fils 58
3.1.5 - Mécanismes de dégradation des câbles métalliques 58
3.2 - Culots d'ancrage 60
3.3 - Selles, sellettes et colliers d'épanouissement 61
3.4 - Suspentes 61
4 - Tabliers 61

5 - Appareils d'appui 62
6 - Protection anticorrosion des suspensions 63
6.1 - Origine des défauts et des désordres des protections anticorrosion 63
6.2 - Zones préférentielles de corrosion 64
7 - Rupture fragile des aciers 64

Chapitre 4 - Surveillance 65

1 - Spécificités de ces ouvrages : points à surveiller particulièrement 65
2 - Surveillance des câbles 65
2.1 - Contrôles visuels 65
2.2 - Oxydation 66
2.3 - Identification de zones de stagnation d'eau 67
2.4 - Détection de fils rompus 67
3 - Surveillance des massifs d'ancrage à tirants d'ancrages scellés dans le sol 69
4 - Surveillance d'un système de déshumidification 69
4.1 - Le monitoring 69
4.2 - Les déshumidificateurs 70
4.3 - Les dispositifs sur le câble 70
5 - Surveillance effectuée dans le cadre du patrouillage de surveillance générale du réseau 70
6 - Contrôle annuel 70
6.1 - Approche globale de l'ouvrage 71
6.2 - Suspension 71
6.3 - Tablier 71
6.4 - Chaussée et trottoirs 71
6.5 - Joints de chaussée et de trottoirs 71
6.6 - Appareils d'appui 72
6.7 - Dispositifs de retenue 72
6.8 - Dispositifs d'évacuation des eaux 72
7 - Visite d'évaluation 72
8 - Inspections détaillées 72
8.1 - Fréquence et objectifs des inspections détaillées 72
8.2 - Préparation 72
8.2.1 - La pré-visite 72
8.2.2 - L'étude du dossier d'ouvrage 73
8.3 - Les six grandes phases de l'inspection détaillée 73
8.3.1 - L'approche générale 73
8.3.2 - L'examen de la suspension 73
8.3.3 - L'examen des ancrages 73
8.3.4 - L'examen des appuis 74
8.3.5 - L'inspection des superstructures 74
8.3.6 - L'examen de l'intrados 74
8.4 - La rédaction du rapport 74
9 - Exemples de programme de surveillance 74
9.1 - Exemple de programme pour un petit ouvrage suspendu 74
9.2 - Exemple de programme pour un grand ouvrage suspendu 74

10 - Surveillance renforcée et haute surveillance 75
10.1 - Surveillance acoustique 75
10.2 - Suivi géométrique 76
10.2.1 - Points à contrôler 77
10.2.2 - Tableau comparatif 77

Chapitre 5 - Entretien 78
1 - Entretien courant 78
1.1 - Appareils d'appui 78
1.2 - Protection anticorrosion des câbles et suspentes 78
1.3 - Ensemble de l'ouvrage 78
2 - Entretien spécialisé 78
2.1 - Appareils d'appui 78
2.2 - Entretien d'une déshumidification 78
2.2.1 - Les déshumidificateurs 78
2.2.2 - Gaines, étanchéité des joints et colliers 78
2.2.3 - Le monitoring 79
2.3 - Protection périodique du système anticorrosion de la suspension 79
2.4 - Réfection totale de la protection anticorrosion des suspensions 79
2.4.1 - Définition de l'opération de remise en peinture 79
2.4.2 - Recherche documentaire 80
2.4.3 - Visite de reconnaissance 80
2.4.4 - Essai préalable de décapage 80
2.4.5 - Consistance des travaux 80
2.5 - Réglage de suspension 81
2.5.1 - Les objectifs du réglage 82
2.5.2 - Méthodologie(s) de réglage 82
2.5.3 - Un point particulier : les appareils d'appui 84
2.5.4 - Conclusion 84

Chapitre 6 - Diagnostic et réparation 85
1 - Diagnostic d'un déréglage de suspension 85
2 - Méthodes de diagnostic spécifiques 85
2.1 - Auscultation électromagnétique 85
2.1.1 - La mesure du taux d'oxydation 85
2.1.2 - La détection de défauts 85
2.2 - Mesure de tension dans des câbles ou dans des barres 86
2.2.1 - Méthode de pesage « effort déformation » 86
2.2.2 - Méthode vibratoire 86
2.2.3 - Méthode ultra-sonore 88
2.3 - Ouverture de faisceaux pour examen visuel des câbles élémentaires internes 88
3 - Réparations 89
3.1 - Remplacement de culots 89
3.1.1 - Objectif d'un remplacement de culots 89
3.1.2 - Cinématique d'un remplacement de culots 89
3.2 - Changement de suspentes 90

3.3 - Changement de suspension 91
3.3.1 - Les principes 91
3.3.2 - Les questions à se poser 91
3.3.3 - Différentes familles de solutions 92
3.3.4 - Exemple d'un changement de suspension sur une travée suspendue 92
3.4 - Réparation des poutres de rigidité 92
3.4.1 - Causes du déversement des poutres de rigidité 92
3.4.2 - Adaptation des poutres de rigidité 93
3.5 - Les platelages 93
3.6 - Massifs d'ancrage 93
3.6.1 - La stabilité externe 93
3.6.2 - Les ancrages des câbles 94
3.7 - Réparation ou remplacement des selles et sellettes 95
Bibliographie 96

Les annexes sont uniquement téléchargeables sur le site du Cerema

Avant-propos

Le présent document est l'un des fascicules techniques constituant le corpus technique de la nouvelle Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art.

La nouvelle Instruction est complétée par les trois premiers fascicules d'application suivants qui lui sont annexés :

- Fascicule 1 - Dossier d'ouvrage ;
- Fascicule 2 - Généralités sur la surveillance ;
- Fascicule 3 - Mesures de sécurité - Auscultation - Surveillance renforcée - Haute surveillance.

Les autres fascicules qui constituaient la seconde partie de l'ITSEOA de 1979 ne font plus partie intégrante de l'Instruction et sont désormais des guides techniques. La liste de ces guides techniques est la suivante :

- Fascicule 04 - Surveillance topométrique ;
- Fascicule 10 - Fondations en site aquatique ;
- Fascicule 11 - Fondations en site terrestre ;
- Fascicule 12 - Appuis ;
- Fascicule 13 - Appareils d'appui ;
- Fascicule 20 - Zone d'influence - Accès - Abords ;
- Fascicule 21 - Équipements des ouvrages ;
- Fascicule 30 - Ponts et viaducs en maçonnerie ;
- Fascicule 31 - Ponts en béton non armé et en béton armé ;
- Fascicule 32 - Ponts en béton précontraint ;
- Fascicule 33 - Ponts métalliques et mixtes ;
- **Fascicule 34-1 - Ponts suspendus ;**
- Fascicule 34-2 - Ponts à haubans ;
- Fascicule 35 - Ponts de secours ;
- Fascicule 40 - Tunnels, tranchées couvertes, galeries de protection ;
- Fascicule 50 - Buses métalliques ;
- Fascicule 51 - Ouvrages de soutènement ;
- Fascicule 52 - Déblais et remblais ;
- Fascicule 53 - Ouvrages de protection.

Ce document a été rédigé par un groupe de travail comportant des membres appartenant aux directions interdépartementales des routes et aux services du réseau des organismes scientifiques et techniques du Ministère de la transition écologique et solidaire et du Ministère de la cohésion des territoires.

Son contenu a été validé par le comité de pilotage de l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art dans lequel sont représentés :

- le ministère (DGITM/DIT) ;
- les directions interdépartementales des routes (DIR) ;
- les collectivités locales ;
- le réseau scientifique et technique (Cerema, Université Gustave Eiffel) ;
- des maîtres d'ouvrage d'infrastructures ferroviaires (SNCF-Réseau, RATP).

Il a fait l'objet d'une relecture auprès de représentants du réseau des organismes scientifiques et techniques, de services de l'État et de collectivités territoriales.

Chapitre **1**

Champ d'application

Le présent fascicule vise à aider les acteurs de la gestion et de la surveillance d'un patrimoine de ponts suspendus. Ces derniers sont des ouvrages dont le tablier, le plus souvent métallique, est accroché par l'intermédiaire de suspentes à des câbles paraboliques passant au sommet de pylônes. Ces ponts ne doivent pas être confondus avec les ponts à haubans qui font l'objet du fascicule 34-2.

Les opérations de surveillance, d'entretien et de réparation des ponts suspendus requièrent un savoir-faire exigeant que ce soit pour la connaissance des matériaux utilisés, des technologies utilisées ou pour le mode de fonctionnement.

Ce fascicule concerne essentiellement les ponts suspendus construits jusque dans les années 1970. Il ne couvre pas les quelques ouvrages suspendus construits très récemment, avec des technologies de câbles beaucoup plus modernes.

Ce fascicule ne traite pas non plus, le cas échéant, des viaducs d'accès à ces ouvrages, lorsqu'ils sont indépendants et constitués par des ouvrages en maçonneries, en béton armé ou en béton précontraint. Ces ouvrages sont en effet déjà traités par les fascicules 30, 31 et 32 de l'ITSEOA. Il en est de même pour les ouvrages d'accès comportant des poutres ou des caissons en acier, qui sont traités par le fascicule 33.

Ce fascicule traite des appuis, des appareils d'appui et des équipements spécifiques aux ponts suspendus. Pour les appuis et les équipements courants de ces ouvrages, le lecteur est renvoyé aux fascicules 10, 12 et 21 de l'ITSEOA.

Le patrimoine des ponts suspendus se caractérise par une très grande diversité des matériaux, des modes de fonctionnement et de la conception détaillée. Si le présent fascicule ne peut prétendre à l'exhaustivité, il s'attache à présenter les techniques les plus usuelles en proposant un classement en grandes familles de typologie.

Chapitre **2**

Généralités

1 - Historique

Des éléments historiques peuvent éclairer les choix technologiques que nous pouvons rencontrer sur les ouvrages suspendus, ce chapitre donne des indications générales sur l'histoire de cette structure depuis deux siècles.

1.1 - Les premiers franchissements

L'origine des ponts suspendus est très ancienne. L'exemple des franchissements encore utilisés par quelques chasseurs cueilleurs montre que, très tôt, les hommes ont dû utiliser des lianes ou cordages de fibres naturelles pour franchir des gorges ou des rivières.

On trouve des traces datant de plus de 2000 ans de ponts suspendus à chaînes de fer en Chine. Dans certains de ces ouvrages, le tablier est suspendu aux chaînes, ce qui permet de donner au tablier une géométrie différente de la géométrie d'équilibre du câble. On trouve aussi de nombreuses références à des ouvrages suspendus anciens dans les hautes terres d'Asie.

Sur le continent américain, les Aztèques utilisaient des ponts suspendus à des cordes de fibres végétales. De son côté, l'empire inca était efficacement desservi par un important réseau routier et bien que les Incas n'utilisaient pas la roue, ils construisaient eux aussi des ponts suspendus à base de cordes de fibres végétales pour franchir les gorges des cordillères andines. Ces ouvrages utilisés par des piétons et des animaux étaient constitués d'un platelage posé sur des cordes inférieures, des cordes latérales servant de garde-corps. L'empire inca était rigoureusement administré et les cordes porteuses étaient changées une fois par an.

Lors de leur arrivée au XVI^{e} siècle, les conquistadors espagnols ont trouvé un réseau routier comportant environ 200 ponts dont certains dépassaient 50 m de portée. Ils ont d'ailleurs franchi ces ouvrages avec des chevaux lors de leur invasion ce qui donne une idée de leur capacité.

Les ponts suspendus à base de cordages ont fait très tôt partie de l'arsenal des possibilités de franchissement des rivières par les armées en campagne. Dans un livre écrit en 1625, le mathématicien et physicien Faustus Verantuis décrit des ponts suspendus structurés comme les ponts modernes. Il énumère les deux systèmes employés : le premier lorsque le plancher servant à la circulation est établi directement sur les chaînes, le second lorsque le plancher horizontal est suspendu par des cordes verticales aux chaînes porteuses.

1.2 - Les premiers ponts suspendus modernes

1.2.1 - Les premières réalisations de l'ère industrielle

On peut situer le début des ponts suspendus modernes au début de la révolution industrielle (utilisation d'un tablier horizontal suspendu à des chaînes ou à un câble porteur parabolique, de matériaux métalliques produits par l'industrie et de calculs de dimensionnement pour justifier les sections retenues).

James Finley, irlandais de naissance commença à construire des ponts importants aux États-Unis en 1796. Dans les ouvrages de James Finley, les chaînes en fer sont supportées par des poteaux et le platelage, globalement horizontal, est suspendu aux chaînes porteuses par des tiges verticales. En 1808, il existait déjà quarante ponts du système Finley, dont le franchissement de la rivière Schuylkill d'une ouverture de 92,60 m.

En France, l'ingénieur Belu présenta un projet de franchissement d'un bras du Rhin en 1793. Il s'agissait d'un pont suspendu à chaînes de 250 m de portée, les chaînes supportant directement le platelage. L'ouvrage n'a pas été réalisé.

Le premier pont suspendu ouvert aux voitures en Angleterre est réalisé par le capitaine Brown, propriétaire d'une fabrique de câbles de fer. Il se situe à Kelso et franchit la Tweed. Sa portée est de 110 m et il est ouvert à la circulation en 1820.

L'ingénieur français Brunel construit des ouvrages en Angleterre et en France dans les années 1820. Il est le premier à employer des chaînes inférieures sous le tablier des ponts légers afin d'améliorer leur résistance au vent. Un ouvrage de ce type est réalisé sur l'île Bourbon (La Réunion) située sur la route des cyclones tropicaux. Ce pont, qui existe toujours, est aujourd'hui fermé à la circulation.

En Angleterre, Thomas Telford fit progresser la technique des ponts suspendus autour de 1830. Son ouvrage à chaînes de Conwy, d'une portée de 99,70 m, a été mis en service en 1826. Cet ouvrage de 177 m de portée qui était le plus grand pont suspendu de l'époque est aujourd'hui réservé à la circulation piétonne. Thomas Telford projeta par ailleurs sur la rivière Mersey un ouvrage de 305 m de portée qui n'a pas été réalisé.

1.2.2 - En France – Navier – Seguin – Chaley

De nombreux ouvrages suspendus ont été construits à partir du début du XIX^{e} siècle avec plus ou moins de succès.

À cette époque, les appuis en rivière étaient très difficiles à réaliser ce qui donnait aux ponts suspendus un très gros avantage par rapport aux autres types d›ouvrage.

Une analyse de ce nouveau type d'ouvrage a été demandée à Navier en 1821. Après deux voyages en Angleterre où il a en particulier rencontré Telford, Navier rédige les conclusions de ses travaux sous forme d'un mémoire qui s'est immédiatement imposé comme un document fondamental concernant la conception et le calcul des ponts suspendus.

Dans son mémoire, Navier situe les ordres de grandeur des coûts de l'époque ; les ouvrages classiques y sont classés par ordre de coût croissant de la manière suivante : pont à tablier et palées en bois, pont à piles en pierre et tablier en bois, pont à piles en pierre et arcs en fonte et ponts en maçonnerie de pierre. Le coût du pont suspendu se situe alors approximativement au niveau de celui du pont à piles de pierres et tablier de bois.

RAPPORT

A MONSIEUR BECQUEY,

MÉMOIRE

SUR LES PONTS SUSPENDUS;

Par M. NAVIER,

A PARIS,

Figure 1 : Mémoire sur les ponts suspendus par M. Navier – 1823

On peut trouver dans ce mémoire les éléments fondamentaux suivants :

- un bref historique et un état très détaillé des ouvrages suspendus existants ;
- une réserve vis-à-vis des structures haubanées à limiter aux ouvrages piétonniers les plus modestes ;
- une réserve formelle vis-à-vis des structures hybrides qui s'appuie sur les incompatibilités de déformations entre les structures haubanées et les structures suspendues ;
- une étude théorique exhaustive du câble (inextensible puis extensible) : géométrie d'équilibre du câble seul, sous une charge répartie constante puis sous l'effet de charges variables. Elle présente également le calcul des tensions maximales, des longueurs développées et des effets des variations thermiques. Les aspects dynamiques y sont aussi abordés. Cette étude est complétée par un exposé des méthodes de calcul des efforts sur les pylônes et ancrages ainsi que des principes de justification de ces éléments ;

- une évaluation des charges d'exploitation basée sur une accumulation de foule de 3 piétons de 65 kg par m^2 (soit 195 kg/m^2) ;
- un coefficient de sécurité de 3 par rapport à la rupture est proposé pour les câbles porteurs, l'exemple du pont des Invalides à Paris montre sans justification un coefficient de sécurité beaucoup plus élevé pour les suspentes.

On trouve aussi les résultats de nombreux essais concernant les matériaux : contrainte d'apparition des déformations permanentes, contrainte de rupture et coefficients de dilatation thermique. À titre d'exemple, des valeurs de 35 à 45 kg/mm^2 sont données pour la rupture des aciers constituant les chaînes.

Navier a établi un projet très détaillé pour un franchissement de la Seine aux Invalides à Paris par un ouvrage suspendu à des chaînes ayant une portée de 155 m. L'ouvrage a été conçu en 1821 et sa réalisation a débuté en 1824. Il a été démoli en 1827 suite à un mouvement d'appuis consécutif à une rupture de canalisation avant sa mise en service.

Seguin se lance en 1820 dans l'étude des ponts suspendus. À son retour d'un voyage d'étude de ce type d'ouvrage en Angleterre, il opte pour les câbles porteurs en fils de fer et réalise un petit pont d'essais de 18 m. Après de nombreux essais sur les structures et matériaux, Seguin réalise en 1825 le pont de Tournon, un ouvrage suspendu à deux travées de 85 m à câbles porteurs en fils de fer.

Seguin écrit alors en 1827 un ouvrage intitulé : « Des ponts en fil de fer ».

DES

PONTS EN FIL DE FER;

PAR SEGUIN aîné.

A PARIS,

CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,

1826.

Figure 2 : Les ponts en fil de fer par M. Seguin – 1827

On peut y trouver les éléments suivants :

- une synthèse des méthodes de calcul de Navier conservant la partie la plus utile (calcul des longueurs de câbles et de la traction maximale) ;
- le rappel du principe d'évaluation de la charge d'exploitation maximale (3 piétons +par m^2) et du coefficient de sécurité de 3 par rapport à la rupture ;
- de nombreux renseignements techniques et technologiques sont fournis (détails du projet mais aussi de la fabrication des câbles, de leur protection, du montage et des réglages). Il est insisté sur l'intérêt des poutres de rigidité (treillis de bois ou treillage de fil de fer), de l'attelage des suspentes situées dans les zones où le câble est le plus incliné et sur la possibilité d'ajouter des câbles au vent). Un diamètre minimal de 3 mm est évoqué relativement à des critères de sensibilité à la corrosion ;
- de nombreux résultats d'essais sur fils sont fournis, des valeurs minimales de l'ordre de 60 kg/mm^2 de contrainte à la rupture apparaissent.

Alors qu'en Angleterre et en Allemagne, on préférait construire des ponts suspendus à chaînes, on utilisa très tôt en France, en Suisse et en Amérique, des câbles métalliques afin de profiter de la résistance accrue par écrouissage des aciers tréfilés.

Seguin construit en particulier sur le Rhône à Tournon un pont suspendu à deux travées de 85 m qui fut mis en service en 1825.

Figure 3 : Pont suspendu d'Andance conçu par Marc Seguin et mis en service en 1827

L'ingénieur français J. Chalais fit construire en 1834 un pont à câbles de fil de fer d'une portée de 273 m à Fribourg en Suisse.

La circulaire du 25 août 1832 provoque un essor des ponts suspendus. Environ 400 ponts ont été construits avec le système Seguin.

1.2.3 - Aux États-Unis, John Augustus Roebling et son fils Washington

Aux États-Unis, l'ingénieur John Augustus Roebling et son fils Washington ont fait évoluer la technologie et les méthodes constructives des ponts suspendus mais aussi largement progresser leur portée.

John A. Roebling arrive en 1831 aux États-Unis où il crée une unité de production pour fabriquer lui-même les fils d'acier utilisés dans les câbles porteurs des ponts suspendus. Il se consacre pendant plusieurs années à la construction d'un unique pont de chemin de fer au-dessus de la vallée du Niagara. La souplesse inhérente au principe des ponts suspendus pose des problèmes de maîtrise des déformations lors du passage des charges élevées des trains. Pour permettre le franchissement des 250 m de portée, Roebling utilise des poutres de rigidité latérales en bois de 6 m de haut et des câbles inclinés près des pylônes. L'ouvrage est mis en service en 1855. Le pont de Cincinnati conçu lui aussi par Roebling est quant à lui mis en service en 1866 et atteint une portée de 322 m.

Roebling proposa le projet d'un pont suspendu d'une portée de 487 m sur l'East River à Brooklyn mais il mourut en 1869 des suites d'un accident survenu pendant les travaux préparatoires. Son fils Washington A. Roebling lui succède, mais est victime en 1872 d'un accident de décompression pendant l'exécution des fondations à l'air comprimé. Paralysé, il sera secondé par son épouse pour diriger les travaux de l'ouvrage qui sera finalement mis en service en 1883.

Au total, onze ouvrages ont été construits par les Roebling :

- 1844 Allegheny Aqueduct Bridge Pittsburgh, Pennsylvanie ;
- 1846 Smithfield Street Bridge Pittsburgh, Pennsylvanie ;
- 1848 Lackawaxen Aqueduct ;
- 1849 Roebling's Delaware Aqueduct ;
- 1850 High Falls Aqueduct ;
- 1850 Navaro Aqueduct ;
- 1854 Niagara Falls Suspension Bridge ;
- 1859 Allegheopy Bridge ;
- 1867 John A. Roebling Suspension Bridge ;
- 1869 Waco Suspension Bridge ;
- 1883 Brooklyn Bridge, New York.

Les ouvrages de J.A. et W. Roebling ont les caractéristiques suivantes :

- ils utilisent des câbles à fils parallèles ;
- ils sont rigidifiés par de puissantes poutres de rigidité et des haubans dans les zones proches des pylônes ;
- leur dimensionnement est effectué sur la base de calculs très sommaires (la note de calculs ne fait que quelques pages). Des hypothèses simplificatrices sont prises comme une répartition des charges d'exploitation sur toute

la travée et un partage forfaitaire de la charge totale entre les haubans (1/4 à 1/3) et les câbles porteurs. Ce calcul est complété par l'utilisation de coefficients de sécurité élevés (habituellement entre 4 et 5 et exceptionnellement égal à 7).

Les câbles à fils parallèles d'origine sont toujours en service dans le pont de Brooklyn.

1.2.4 - Les premiers accidents

De nombreux ouvrages construits au début du XIX^{e} siècle en France et en Angleterre ont été rapidement endommagés ou même détruits, le plus souvent par des vents violents mais aussi par des surcharges. L'effondrement du pont de la Basse Chaîne à Angers en 1850 lors du passage d'une troupe provoqua plus de 200 victimes et plongea les ponts suspendus dans un discrédit durable qui stoppa pratiquement leur construction en France.

Le pont s'écroule au moment où les troupes du 11^{e} régiment d'infanterie légère l'empruntent pour franchir la Maine par très mauvais temps. La commission d'enquête mettra en avant plusieurs facteurs, la mise en résonance de la structure sous l'effet du vent violent et/ou le pas des soldats ainsi que la rupture des câbles porteurs fragilisés par l'oxydation.

La technique des ponts suspendus a cependant persisté à l'étranger et en particulier aux États-Unis.

1.3 - Le renouveau des ponts français

Ferdinand Joseph Arnodin (1824-1924) participe largement à la conception et à la construction des ponts français de la deuxième génération à partir de la fin du XIX^{e} siècle. Il intervient à titre de constructeur ou de concepteur sur plus de vingt ponts à câbles. Il est à l'origine de nombreuses innovations comme les câbles à torsion alternative et la poutre en croix de Saint-André à membrure supérieure et diagonales en câbles qui porte son nom.

Figure 4 : Poutres Arnodin

Il a aussi construit des ouvrages à suspension mixte où la partie située près des pylônes est haubanée alors que la partie centrale est suspendue.

Figure 5 : Suspension Arnodin

F.J. Arnodin est considéré, avec l'architecte espagnol Alberto de Palacio, comme l'inventeur du pont transbordeur. Il a défendu une conception modulaire permettant théoriquement de changer les éléments de suspension un par un.

1.4 - L'effondrement du pont de Tacoma et ses conséquences

Le 17 novembre 1940, un vent modéré est à l'origine de la destruction du pont de Tacoma, ouvrage récemment construit d'une portée centrale de 853 m. La largeur du tablier était de 11,90 m (élancement transversal de 1/73) et les poutres de rigidité étaient des poutres à âme pleine sous chaussée de 2,45 m de hauteur. L'ouvrage était correctement dimensionné en application de la charge statique réglementaire de vent transversal.

1.4.1 - Les causes de l'effondrement

Les constats des premiers constructeurs concernant les mouvements de tablier lors de vents violents et leurs conseils relatifs à l'importance de la rigidité du tablier avaient été oubliés. Le vent a provoqué une instabilité aéroélastique de type flottement de torsion. La combinaison des caractéristiques aérodynamiques du tablier et des caractéristiques dynamiques du pont en flexion et en torsion ont permis l'établissement d'un mouvement périodique. L'énergie motrice apportée par le vent n'étant pas compensée par l'amortissement de la structure, les mouvements se sont amplifiés jusqu'à la ruine de l'ouvrage.

Cet accident a eu plusieurs conséquences importantes :

- les ponts de grande taille furent examinés et renforcés d'urgence ;
- l'analyse de l'accident a conduit à modifier la conception des ponts de grande portée.

Cet accident a également conduit à modifier fortement la conception des tabliers suspendus.

Nous présentons dans ce qui suit tout d'abord les évolutions adoptées par l'école américaine, puis celles choisies par l'école anglaise.

1.4.2 - L' « école américaine »

De puissantes poutres de rigidité latérales en treillis sont ajoutées sous la chaussée (elles offrent donc une certaine transparence vis-à-vis du vent). Leurs membrures inférieures sont reliées par un contreventement horizontal. La rigidité de torsion amenée par la section fermée du tablier permet ainsi de découpler les modes de flexion et de torsion. Cette méthode a été utilisée aux États-Unis, au Japon ainsi que dans les deux grands ponts suspendus français, le pont de Tancarville et le pont d'Aquitaine.

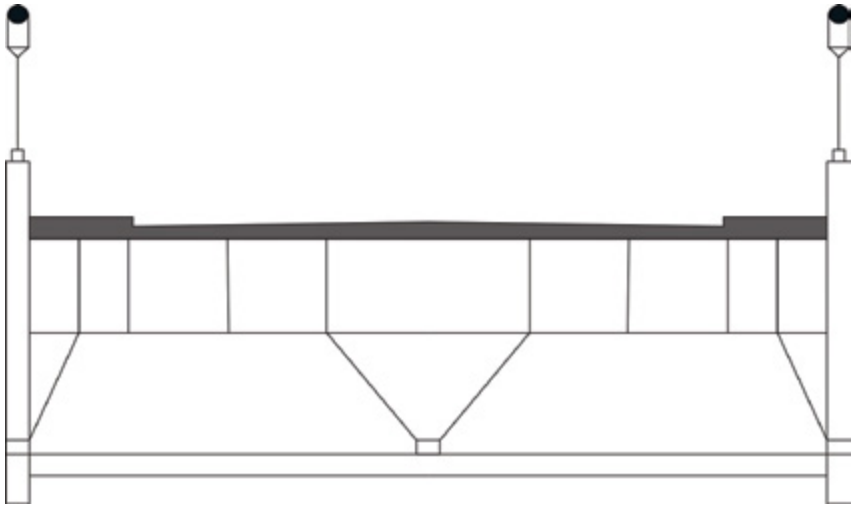


Figure 6 : Coupe-type d'un tablier de l'« école américaine »

1.4.3 - L' « école anglaise »

Le contrôle du comportement dynamique est amélioré par la rigidité de torsion d'un tablier en caisson à dalle orthotrope mais est aussi complété par une modification des caractéristiques aérodynamiques du tablier. Celui-ci est profilé (en forme d'aile inversée) afin d'intervenir directement sur la source du phénomène. Cette méthode retenue en 1966 pour le pont sur la Severn a surtout été utilisée par les Européens.

Figure 7 : Coupe-type d'un tablier de l'« école anglaise »

1.5 - Quelques repères historiques

Les méthodes de calcul

Quelques repères temporels permettent de situer les méthodes de calcul et de dimensionnement disponibles lors de l'établissement des projets des ouvrages.

- 1678 : Hypothèse de Hook ;
- 1703 : Mémoire de Bernoulli ;
- 1823 : Rapport et mémoire sur les ponts suspendus de Navier ;
- 1840 : Théorie de l'élasticité ;
- 15 juin 1869 : Premier règlement de charges ;
- 9 juillet 1877 : Premier règlement de ponts métalliques ;
- 20 octobre 1906 : Premier règlement de béton armé ;
- 2e trimestre 1937 : Revue acier : Les ponts suspendus (calculs, fabrication, montage) ;
- à partir de 1945 : diffusion de la méthode de calcul dite de « Courbon ».

On constate que lors de la construction de la première génération de ponts suspendus les outils théoriques étaient pratiquement inexistants (jusqu'à la parution du mémoire de Navier en 1823) et qu'il a fallu attendre le milieu du vingtième siècle pour bénéficier des travaux de synthèse de Jean Courbon. Ces derniers donnent une méthode analytique aux grands déplacements et prennent en compte de manière rigoureuse l'association câble porteur - poutre de rigidité.

1.6 - Les grandes portées, le domaine d'emploi actuel des ponts suspendus

Ponts suspendus marquants

Le tableau ci-dessous rappelle les caractéristiques de quelques ponts suspendus ayant marqué l'histoire de la construction de ce type d'ouvrages.

Nom	Pays	Portée principale	Date d'achèvement des travaux
Pont à chaînes de Menai	Grande-Bretagne	177 m	1826
Grand pont suspendu de Fribourg	Suisse	273 m	1834
Pont de Wheeling sur l'Ohio	États-Unis	308 m	1849
Pont rail des chutes du Niagara	États-Unis	250 m	1855
Pont de Cincinatti sur la rivière Ohio	États-Unis	322 m	1866
Pont de Brooklyn	États-Unis	487 m	1883
Pont Georges Washington, à New York	États-Unis	1067 m	1931
Golden Gate Bridge, à San Francisco	États-Unis	1 281 m	1937
Pont de Verrazano, à New York	États-Unis	1 298 m	1964
Pont sur la Humber	Grande-Bretagne	1 410 m	1981
Pont du Grand Belt	Danemark	1 624 m	1998
Pont Akashi-Kaikyo	Japon	1 991 m	1998
Projet sur le détroit de Messine	Italie	3 300 m	Pour mémoire, non construit

Domaine d'emploi des ponts suspendus

Le domaine d'emploi technique et économique des ponts suspendus est constitué par les portées supérieures à 800 m.

Ce domaine d'emploi très spécifique trouve son origine dans plusieurs facteurs :
- un pont suspendu nécessite des massifs d'ancrage très coûteux ;
- sa technologie est complexe, ce qui conduit à des coûts de maintenance élevés ;
- le changement éventuel d'un câble porteur est une opération très délicate et coûteuse.

Du fait de ces trois facteurs, à portée identique, un maître d'ouvrage préférera toujours une solution classique, y compris haubanée, à un pont suspendu.

Le diagramme ci-dessous, issu du Bulletin de l'OTUA n° 21, montre l'augmentation des portées des ponts suspendus depuis 1800 mais aussi comment à partir de 1950, les ponts à haubans ont supplanté les ponts suspendus dans le domaine des grandes portées, laissant à ces derniers quelques rares très grandes brèches :

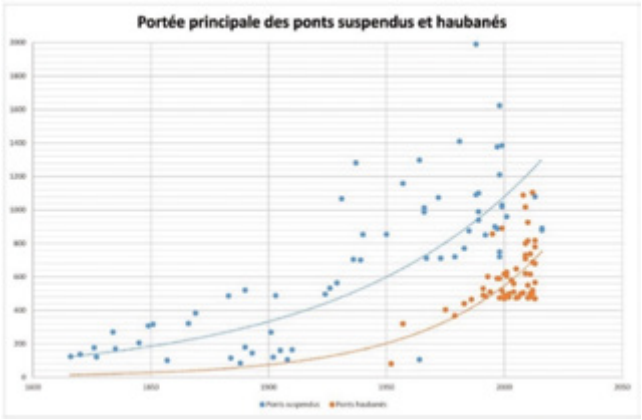


Figure 8 : Évolution des portées franchies par les ponts suspendus et haubanés depuis 1800

1.7 - Histoire administrative des ponts suspendus français

En 1798, tous les bacs établis sur les fleuves, rivières ou canaux navigables étaient concédés par l'État, qui se chargeait de répartir les concessions et de contrôler les tarifs pratiqués.

Les bacs avaient de nombreux inconvénients et la révolution industrielle n'admit pas la limitation du trafic qu'ils imposaient.

Dès le début du XIX^{e} siècle, des autorisations royales ont permis le remplacement des bacs par des ponts.

Ceci donna une réelle autorité technique à l'administration des Ponts et Chaussées, soutenue par le corps des Ponts, grand ordonnateur de l'infrastructure du système de communication français, mais sans réels moyens financiers.

C'est alors qu'un modèle de financement anglais fit école : la concession. Ce modèle ne sollicitait pratiquement pas les finances publiques (tant à la construction qu'à l'exploitation), tout en laissant l'évolution de l'infrastructure publique sous le contrôle total de l'État via les ordonnances royales.

Ces ordonnances fixaient les tarifs et la durée des concessions à l'expiration desquelles ces ponts doivent être intégrés au domaine public.

L'explosion des mises en concession va largement favoriser l'essor des ponts suspendus entre 1820 et 1860, moins chers, plus rapidement construits et sans les risques liés à la construction des appuis en rivières. Cet essor décroît après 1850 suite à l'accident du pont d'Angers au passage de la troupe.

À la fin du XIX^{e} siècle, les péages ont été considérés comme des entraves à la liberté de circulation alors que des incidents et des accidents répétés survenaient suite au mauvais entretien des ouvrages. L'État rachète donc l es concessions et établit la gratuité des ouvrages.

Les ponts suspendus vont, dès lors, être entretenus avec beaucoup de difficultés.

En 1927, une circulaire définit de nouvelles charges réglementaires incluant un camion de 16 tonnes. La mise à niveau qui s'en suivit sur les ouvrages nationaux conduit entre 1930 et 1935 à une importante modernisation des ponts suspendus. À cette époque, bon nombre de ces ouvrages est profondément modifié pour s'adapter à cette circulaire.

En 1944, des faits de guerre mettent à mal certains d'entre eux. Ils sont détruits et remplacés le plus souvent par des ouvrages plus modernes.

Pour les ouvrages restants, la substitution des derniers platelages en bois par des caissons ARNODIN (caissons en tôle pliée) va se généraliser, ainsi que le bétonnage des chambres d'ancrage et la sortie des culots d'ancrages des zones les plus humides.

À partir des années 1970, certains accidents vont relancer l'attention des maîtres d'ouvrage sur le problème de vieillissement des suspensions, des poutres de rigidité, des platelages et des matériaux.

L'accident du pont de Meyronnes en 1970, celui du pont de Sully-sur-Loire en 1985, l'incident du pont de Teil en 2008 et bien d'autres incitent les gestionnaires à une grande prudence vis-à-vis de certaines pièces essentielles qui ont beaucoup vieilli ou ont été conçues à partir de matériaux de qualités aujourd'hui jugées médiocres. Ceci est d'autant plus important que les méthodes de diagnostic actuellement disponibles ne permettent pas d'avoir une connaissance parfaite et sans faille de l'état interne de certains organes.

Ainsi, à partir des années 1980, les derniers câbles à fils parallèles sont pratiquement tous remplacés par des câbles toronnés le plus souvent galvanisés.

Compte tenu des difficultés évoquées ci-dessus, il est essentiel pour les maîtres d'ouvrage de connaître parfaitement l'histoire de chaque ouvrage suspendu dont il a la gestion. Cette connaissance permet en effet de retrouver, par exemple, l'âge des différentes pièces essentielles et d'en appréhender les risques potentiels.

Le réseau technique et scientifique français, qui a pu capitaliser et mutualiser une bonne connaissance de ces pathologies, des risques et des limites et faiblesses des anciens matériaux utilisés, a développé et développe encore des méthodes de diagnostic.

1.8 - Les ponts suspendus en France

On trouvera ci-dessous les caractéristiques de quelques ponts suspendus français marquants.

Concurrencés par les ponts à haubans, les ponts suspendus sont de moins en moins utilisés en France pour franchir économiquement des obstacles même importants. Des considérations esthétiques ou un usage réservé aux piétons et cycles peuvent toutefois conduire à projeter des structures suspendues, même pour des portées moyennes.

Ouvrages français routiers ou ferroviaires

Nom	Portée principale	Date	Observations
Pont de Cassagne	156 m	1910	Ce pont qui franchit le Têt est un ouvrage ferroviaire à suspension Gisclard construit de 1905 à1908
Pont du Teil	235 m	1931	La suspension de ce pont a été remplacée en 2010/2011.
Pont de Rognonas	255 m	1950	
Pont de Térenez	272 m	1950	Ce pont a été démoli et remplacé par un pont haubané courbe.
Pont d'Ancenis	238 m	1953	La suspension de ce pont a été remplacée en 2012/2015.
Pont de Tancarville	608 m	1959	En 1959, la travée centrale de ce pont était la plus grande travée suspendue d'Europe et reste aujourd'hui la plus grande travée suspendue de France. Sa suspension a été remplacée en 1996/1999.
Pont de la Roche Bernard	245 m	1960	Ce pont est le premier dont les câbles porteurs présentent un coefficient de sécurité de 2.5 au lieu de 3.
Pont d'Aquitaine	394 m	1967	La suspension de ce pont a été remplacée en 2001/2003. A cette occasion, le pont a également été élargi.
Viaduc du Chavanon	300 m	2000	Ce pont comporte une suspension centrale et un tablier en caisson mixte. Certaines de ces suspentes ont été rénovées en 2019.
Grand Pont sur la Loire	200 m	2008	Il s'agit d'un pont suspendu auto-ancré. Les gaines de ces suspentes ont été rénovées en 2011.
Pont de Verdun-sur-Garonne	154 m	2013	

Passerelles piétons

Nom	Portée principale	Date	Observations
Passerelle de Tours	235 m	2000	
Passerelle d'Agen	174 m	2002	
Passerelle du Lac de Monteynard	220 m	2007	
Passerelle Saint-Roch à Serignan	80 m	2016	

On trouvera en annexe 1 une liste exhaustive des ponts et passerelles suspendus français.

2 - Différents types de ponts à câbles

Il existe différents types de ponts à câbles différenciables par leur mode de fonctionnement. Ceux-ci sont l'objet de deux fascicules de l'ITSEOA :

- le fascicule 34-1 : Ponts suspendus ;
- le fascicule 34-2 : Ponts à haubans.

Le lecteur intéressé par les ponts haubanés est renvoyé au fascicule 34-2 de l'ITSEOA.

Cette partie donne des informations générales sur les différents types de ponts à câbles et en particulier sur les ponts suspendus.

2.1 - Les ponts haubanés

Les ponts haubanés ont beaucoup été utilisés (haubans seuls ou suspension mixte) lors de la première extension des ponts suspendus au début du XIX^{e} siècle. Les moyens de calcul de l'époque ne permettaient pas d'évaluer précisément l'état final et encore moins de maîtriser les phases de construction de ces structures fortement hyperstatiques.

Ces ouvrages sont réapparus après la seconde guerre mondiale. Dans un premier temps, ces ponts ont été conçus avec des haubans puissants et espacés pour soutenir un tablier rigide (espacement de plusieurs dizaines de mètres). Dans un second temps, les tabliers s'assouplissant, le nombre de haubans a augmenté jusqu'à aboutir aux conceptions modernes.

Les ponts haubanés sont des structures fortement hyperstatiques. Elles sont triangulées et donc rigides. Les efforts horizontaux dus à l'inclinaison des haubans peuvent en général s'auto-équilibrer. Les composantes horizontales de la traction des haubans s'équilibrent d'une travée à l'autre au niveau des têtes de pylônes, alors que celles appliquées par les attaches basses se compensent en faisant apparaître un effort normal dans le tablier.

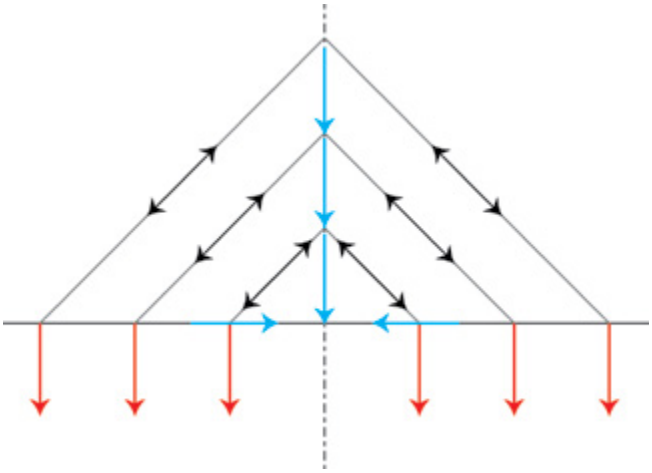


Figure 9 : Schéma d'un pylône haubané
(Les haubans sont tendus, le pylône et le tablier sont comprimés)

Figure 10 : Pont de Nemours

Figure 11 : Pont de Brotonne

2.2 - Les ponts suspendus : association d'un câble porteur et d'une poutre fléchie

Dans les ponts suspendus modernes, on associe une poutre fléchie (ou poutre de rigidité) au câble porteur par l'intermédiaire de suspentes verticales.

Cet élément rigide en flexion intégré au tablier permet de diffuser l'effet de charges ponctuelles sur une plus grande longueur de câble et modère donc les adaptations de celui-ci par changement de forme.

Les poutres de rigidité assurent aussi un rôle important dans la résistance au vent de l'ouvrage.

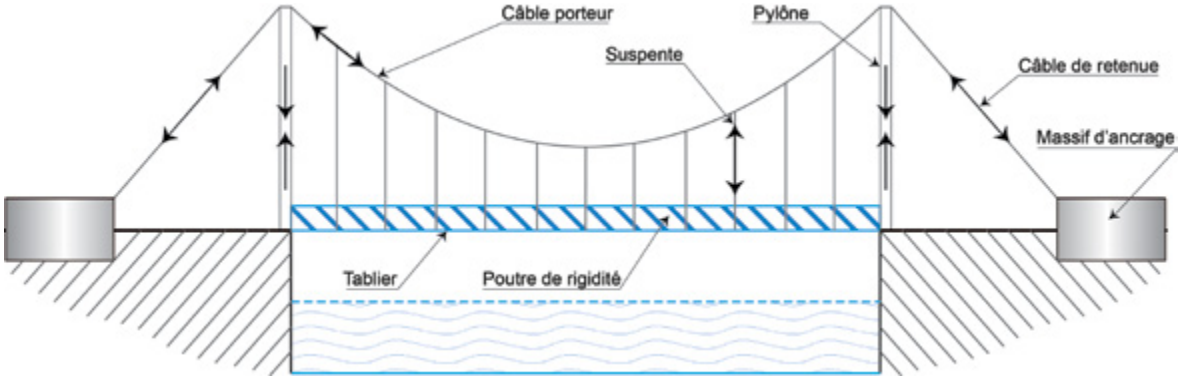


Figure 12 : Schéma d'un pont à une travée suspendue

Dans le cas d'une seule travée suspendue :

- la flèche du câble porteur est de l'ordre de 1/10L, L étant la longueur de la travée suspendue ;
- les câbles de retenue sont habituellement inclinés de 25 à 35 degrés sur l'horizontale.

On distingue plusieurs types de dispositions :

- La travée suspendue couvre la longueur de la brèche. Les pylônes sont alors sur les culées et les massifs et chambres d'ancrage peuvent faire partie intégrante de celles-ci ou être reportées en arrière. Les culées sont alors chargées verticalement par les pylônes et ne supportent, en plus de cet effort vertical, que quelques efforts secondaires dus aux mouvements longitudinaux des câbles et aux appuis du tablier.

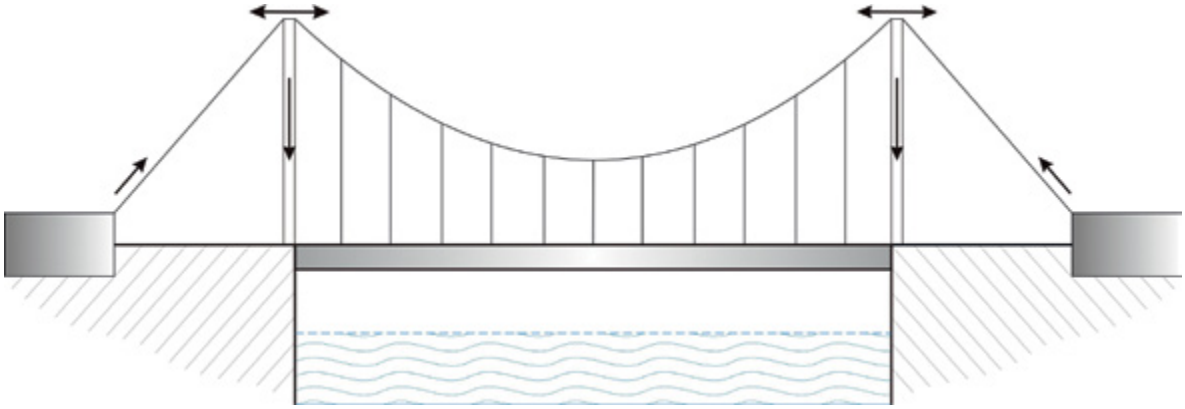


Figure 13 : Pont à une travée suspendue sans travée de rive

Figure 14 : Ouvrages à une travée suspendue

- L'ouvrage ne comporte qu'une travée suspendue, mais celle-ci ne couvre pas toute la longueur de la brèche. Les pylônes sont alors situés sur des piles (en rivière) qui supportent les actions verticales apportées par la suspension. Les piles et culées ont un fonctionnement classique en ce qui concerne les travées de rive.

Figure 15 : Pont à une travée suspendue avec des travées de rive simplement appuyées

- L'ouvrage comporte plusieurs travées suspendues. Les pylônes sont placés sur des piles (le premier peut néanmoins être placé sur la culée), sont comprimés et appliquent donc sur les appuis une force verticale orientée vers le bas. Les massifs d'ancrage sont, suivant les cas, intégrés à la culée ou reportés au-delà.

Figure 16 : Pont à deux travées suspendues

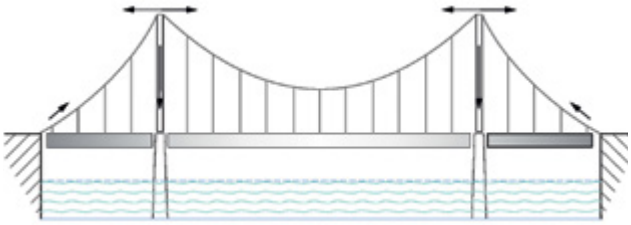


Figure 17 : Pont à trois travées suspendues

Dans le cas de travées multiples, le pont peut être muni de câbles de tête.

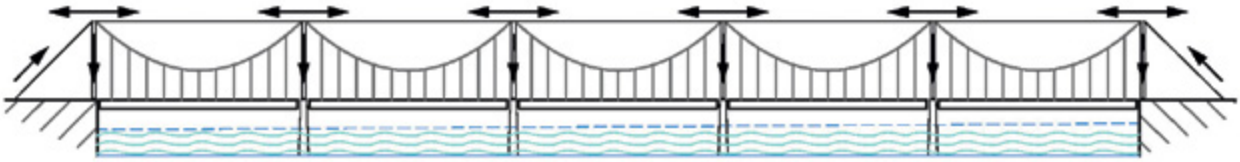


Figure 18 : Pont à travées suspendues multiples et câbles de tête

Figure 19 : Ponts à trois travées suspendues

• Le pont auto-ancré

Dans ce type d'ouvrage très particulier, le plus souvent à trois travées suspendues et tablier continu, la composante horizontale de la traction des câbles porteurs est équilibrée par la compression du tablier. Seules les composantes verticales sont reprises par les appuis. La force est dirigée vers le haut sur les culées, ce qui nécessite l'emploi d'appareils d'appui particuliers dont le rôle est vital pour la structure (ainsi que leurs barres d'ancrage verticales). Les ouvrages de ce type sont peu nombreux en France. Dans l'ouvrage appelé Grand Pont sur la Loire mis en service le 15 décembre 2008, l'ouvrage est bien auto-ancré mais les abouts de tablier sont lestés pour que toutes les actions exercées par l'ouvrage sur ses appuis soient bien dirigées vers le bas. L'ouvrage gagne ainsi nettement en robustesse.

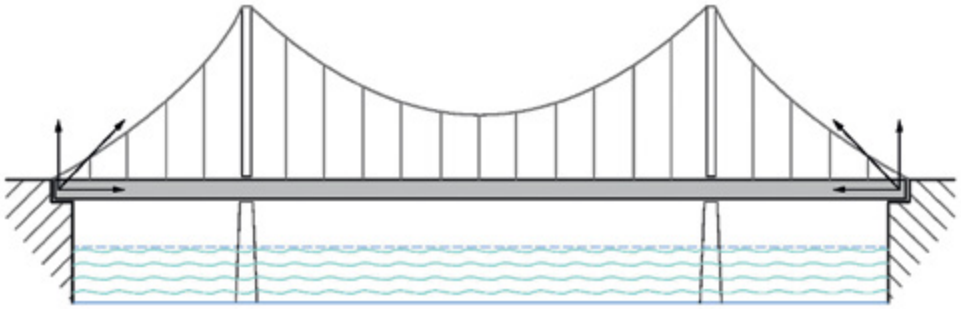


Figure 20 : Schéma de fonctionnement du pont suspendu auto-ancré

Figure 21 : Pont auto-ancré de Rivesaltes

2.3 - Utilisation simultanée d'un câble porteur (dit parabolique) et de haubans : les suspensions hybrides

Très tôt, les constructeurs ont cherché à limiter la souplesse inhérente à la suspension avec câbles porteurs. Il s'agissait de faire passer des trains mais aussi d'avoir une rigidité suffisante pour résister aux vents violents.

C'est pourquoi aux États-Unis, John Augustus Roebling, plus tard remplacé son fils Washington, rigidifient dès le milieu du XIX^{e} siècle ses ouvrages avec des poutres de rigidité en treillis de bois et en ajoutant près des pylônes des haubans alors que le tablier est suspendu aux câbles porteurs sur toute sa longueur.

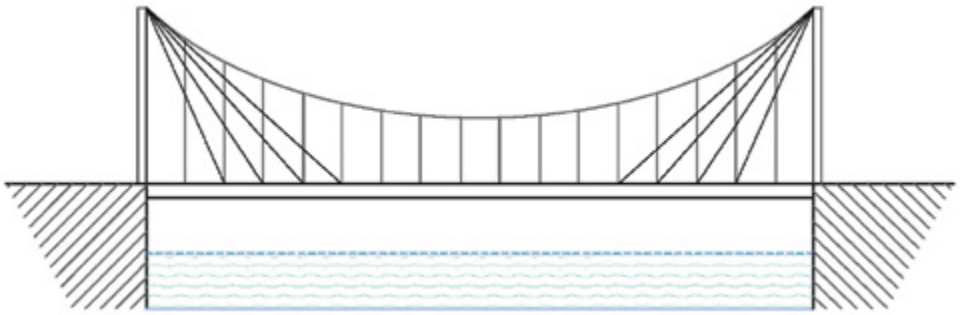


Figure 22 : Suspension hybride « type Roebling »

En France, à la fin du XIX^{e} siècle et au début du XX^{e}, l'ingénieur constructeur Ferdinand Arnodin utilise aussi des haubans à proximité des pylônes, le tablier n'étant suspendu aux câbles porteurs que dans la partie centrale. Il persiste une zone de recouvrement très courte entre la partie suspendue et la partie haubanée.

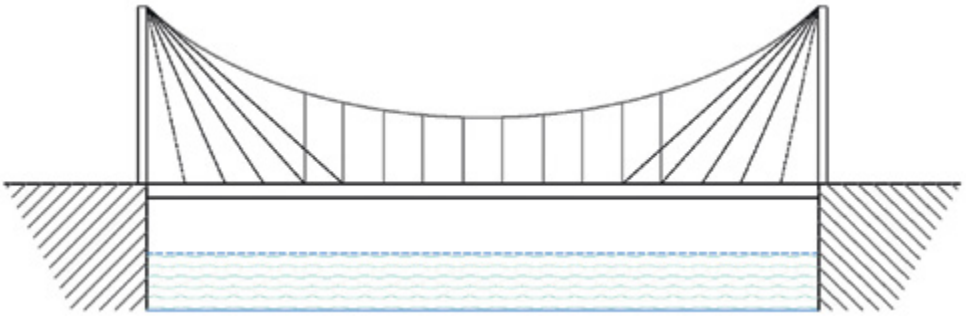


Figure 23 : Suspension hybride « type Arnodin »

Les déformées des parties triangulées et suspendues ne sont pas du même type. Le dimensionnement de ces structures avec les méthodes analytiques utilisées lors de leur construction étant très sommaire, leur bon fonctionnement résulte principalement de l'expérience et de l'intuition des constructeurs qui accordaient correctement les rigidités des haubans, de la suspension et de la poutre.

Ces suspensions hybrides (cette fois calculées avec des méthodes modernes) sont encore envisagées de nos jours pour franchir les très grandes portées.

Les haubans génèrent des efforts horizontaux équilibrés par un effort normal dans le tablier. Celui-ci est repris dans les suspensions Arnodin par un câble horizontal (ou câble de pied) situé au niveau du tablier.

Figure 24 : Suspensions hybrides "Arnodin"

2.4 - Le pont Gisclard

Généralités

Albert Gisclard, commandant du génie militaire, souhaitait faire passer des trains sur des ponts suspendus au début du XX^{e} siècle. La suspension classique était toutefois très souple surtout pour des portées modestes avec de faibles charges permanentes, ce qui la rendait inutilisable pour les trains.

Le calcul et la construction des structures haubanées n'étant pas maîtrisés à cette époque, Gisclard a imaginé une structure triangulée, donc rigide, qui se construisait aussi simplement qu'un pont suspendu, ponts dont le montage était à cette époque maîtrisée depuis presque un siècle.

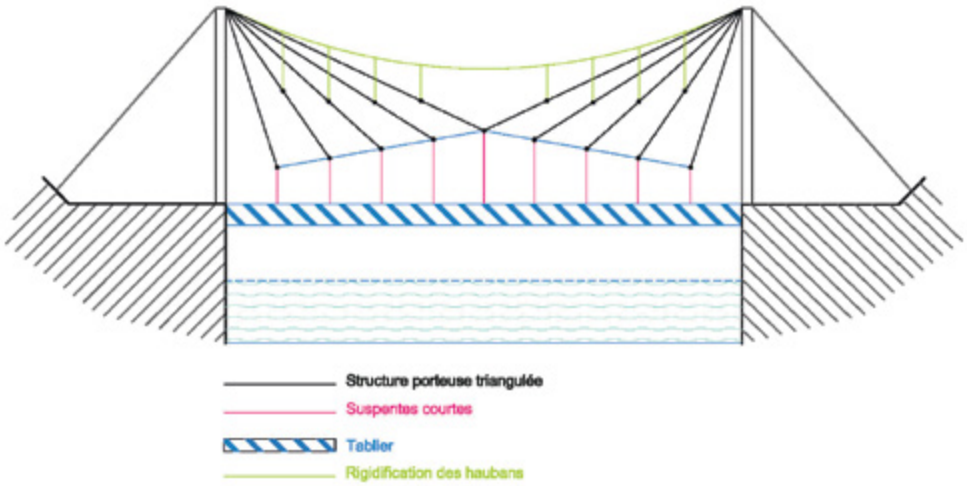


Figure 25 : Schéma de principe du pont Gisclard

Principe du montage

Le principe du réglage est largement simplifié par la triangulation isostatique en câbles tendus, aussi bien en service qu'au montage. Le système ne devient hyperstatique que quand on ajoute le tablier rigide en flexion.

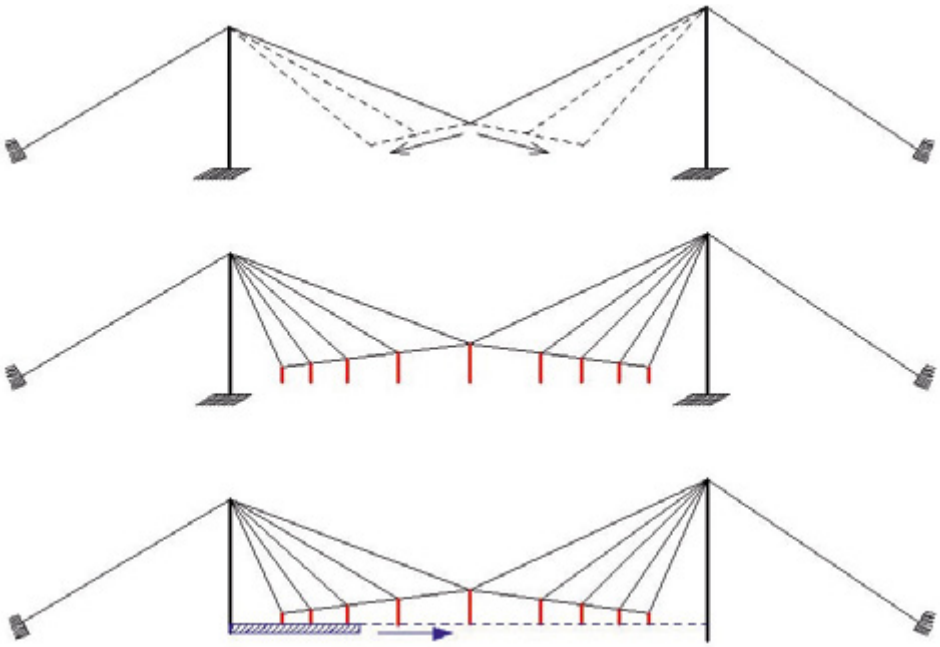


Figure 26 : Schéma de montage d'un pont Gisclard

2.5 - Le pont « liane » ou « ribbon bridge »

Les premiers constructeurs de ponts suspendus cheminaient directement sur les câbles porteurs. Lors de la modernisation du concept au début du XIX^{e} siècle, la question suivante s'est posée : doit-on placer un tablier horizontal suspendu au câble porteur (solution la plus souvent retenue), placer celui-ci au-dessus des câbles porteurs en s'y appuyant par l'intermédiaire de pilettes comprimées ou poser directement un platelage sur les câbles porteurs.

La difficulté de cette dernière solution est bien entendu la géométrie d'équilibre en arc de chaînette que prend l'ouvrage à vide dans ce cas et les pentes qu'il présente aux extrémités.

Si l'on veut réduire ces pentes à une valeur de l'ordre de 8 %, ce qui est déjà important, il convient de limiter la flèche à environ 1/50 de la portée ce qui est très sévère. L'effort de traction nécessaire est conséquent et il est nécessaire de l'ancrer aux extrémités par des tirants d'ancrage.

Le comportement dynamique de ces ouvrages reste délicat.

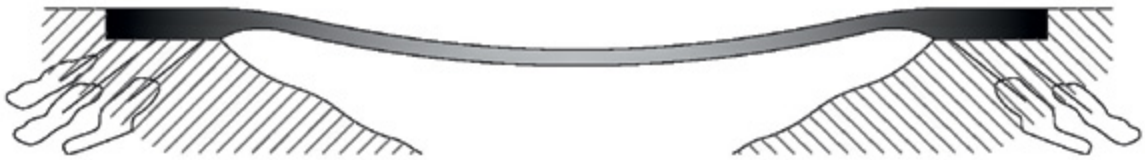


Figure 27 : Schéma de principe du pont liane

Il ne semble pas qu'il y ait actuellement d'ouvrage de ce type en France mais des passerelles pour piétons d'une centaine de mètres ont été réalisées sur ce principe aux États-Unis et en Europe centrale mais aussi au Costa Rica, en Angleterre, en Allemagne et en Suisse.

3 - Méthodes de construction

Les méthodes de construction des ponts suspendus sont dépendantes de leur date de réalisation, de la technologie employée (câbles porteurs et structure du tablier) et de leurs dimensions mais aussi de la nature et de la taille de la brèche. Elles peuvent avoir une influence sur certaines dispositions constructives et de manière marginale sur les sollicitations de réglage. Les problèmes à résoudre lors de la construction sont similaires aux problèmes rencontrés lors des changements de suspension.

Les opérations de construction s'enchaînent habituellement de la manière suivante :

1. construction des appuis, pylônes et massifs d'ancrage ;
2. lançage des câbles porteur ;
3. pose des suspentes ;
4. construction du tablier ;
5. pose des équipements ;
6. réglages.

Le lecteur à la recherche d'informations plus détaillées sur les méthodes de construction des tabliers de ponts suspendus pourra consulter l'annexe 2 de ce guide.

3.1 - La mise en place des câbles porteurs

La technologie de détail dépend du type de câble employé. La mise en place des câbles porteurs est fondamentale pour la maîtrise de la géométrie et de l'état de sollicitation final de l'ouvrage. Les câbles ne doivent plus se déplacer sur leurs appuis (selles d'appui et sellettes de déviation) après le réglage des premiers fils ou torons élémentaires. Les longueurs à contrainte nulle des différentes sections de câbles sont alors définitivement figées.

La mise en place des câbles impose généralement :

- l'installation de portiques provisoires sur les têtes de pylônes ;
- l'installation d'un système téléphérique d'un ancrage à l'autre ;
- sur les ouvrages les plus grands, l'installation de passerelles provisoires à câbles, qui permet d'accéder aux câbles sur toute leur longueur pendant leur construction.

3.1.1 - Câbles à fils parallèles de la première génération

Les câbles à fils parallèles étaient réalisés sur le chantier à partir de bobines de fil constitutif. Ils étaient constitués au sol puis ligaturés, les ouvrages de cette génération étant de portée modeste, la mise en place des câbles sur leurs appuis s'effectuait sans difficultés particulières avec des moyens de levage traditionnels.

3.1.2 - Câbles à fils parallèles modernes (ponts suspendus de grandes dimensions aux États-Unis, en Europe du Nord et au Japon)

Cette technologie est dérivée de la précédente. Elle est appliquée aux États-Unis, au Japon et les pays anglo-saxons, pour les ponts suspendus de grandes dimensions.

Il n'existe pas de pont suspendu moderne en France utilisant cette technologie. Le lecteur intéressé se référera à l'annexe 3.

Des portiques provisoires sont installés au-dessus des selles d'appui en tête de pylônes (cette fonction peut être intégrée lors de la conception des chèvres servant à hisser les selles).

La première opération consiste généralement à réaliser un système téléphérique permettant de déplacer des hommes sur toute la longueur du pont et sur la hauteur de la suspension.

Les câbles de section généralement importante sont « tissés » fil par fil. Les fils sont déposés par une roue mue par un téléphérique assurant des mouvements de va-et-vient le long du câble. La constitution du câble est généralement (au moins pour les constructions récentes) facilitée par l'utilisation de passerelles provisoires à câbles ou « cat ways » permettant aux ouvriers d'accéder au câble sur toute sa longueur. On place alors sur ces passerelles des gabarits qui facilitent l'arrangement géométrique des fils lors de la constitution du câble. Les câbles sont ancrés au fur et à mesure de leur constitution par enroulement des fils sur une série de sabots situés dans des chambres implantées dans les massifs d'ancrage. (Il existe une variante à ce mode de construction : elle consiste à lancer des câbles élémentaires de petite section constitués de fils parallèles et terminés par des culots, le câble porteur final étant alors constitué par la réunion et le compactage de ces câbles élémentaires.)

Le faisceau est compacté par une machine se déplaçant sur le câble et conçue à cet effet. Il est ensuite serré avec un fil en acier enroulé sous tension puis peint.

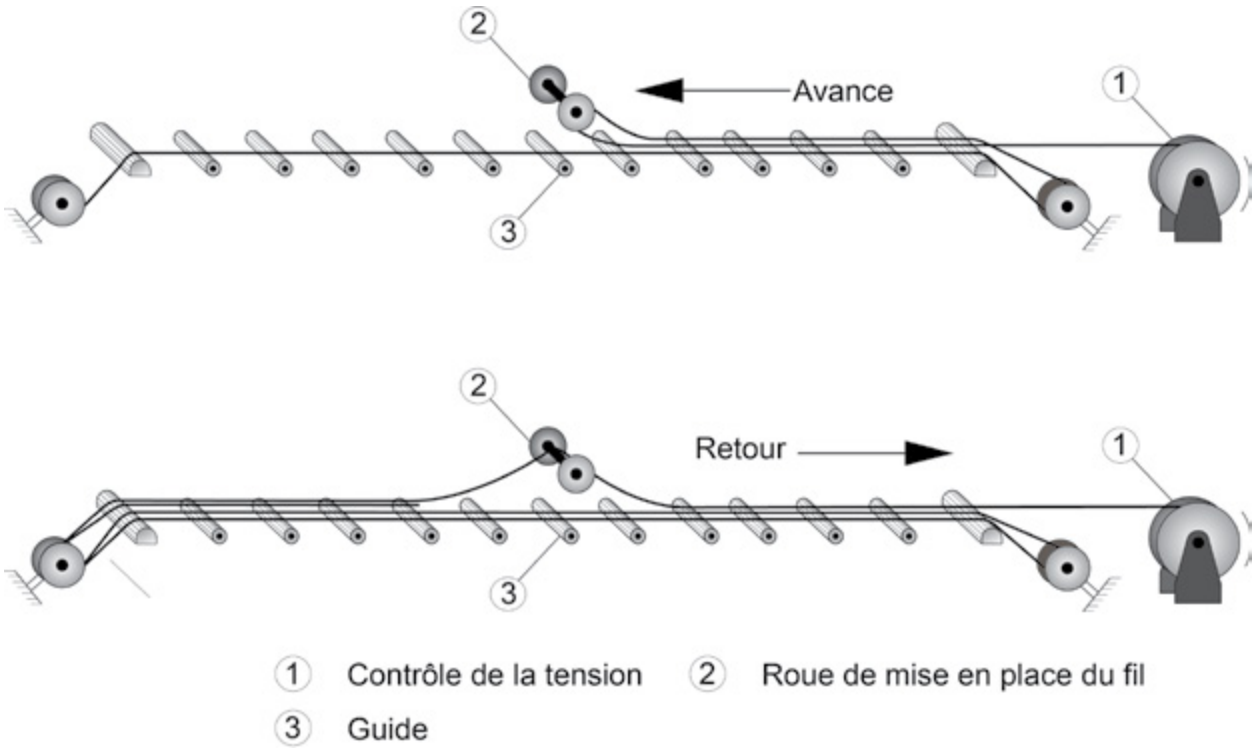


Figure 28 : Principe de construction des câbles à fils parallèles

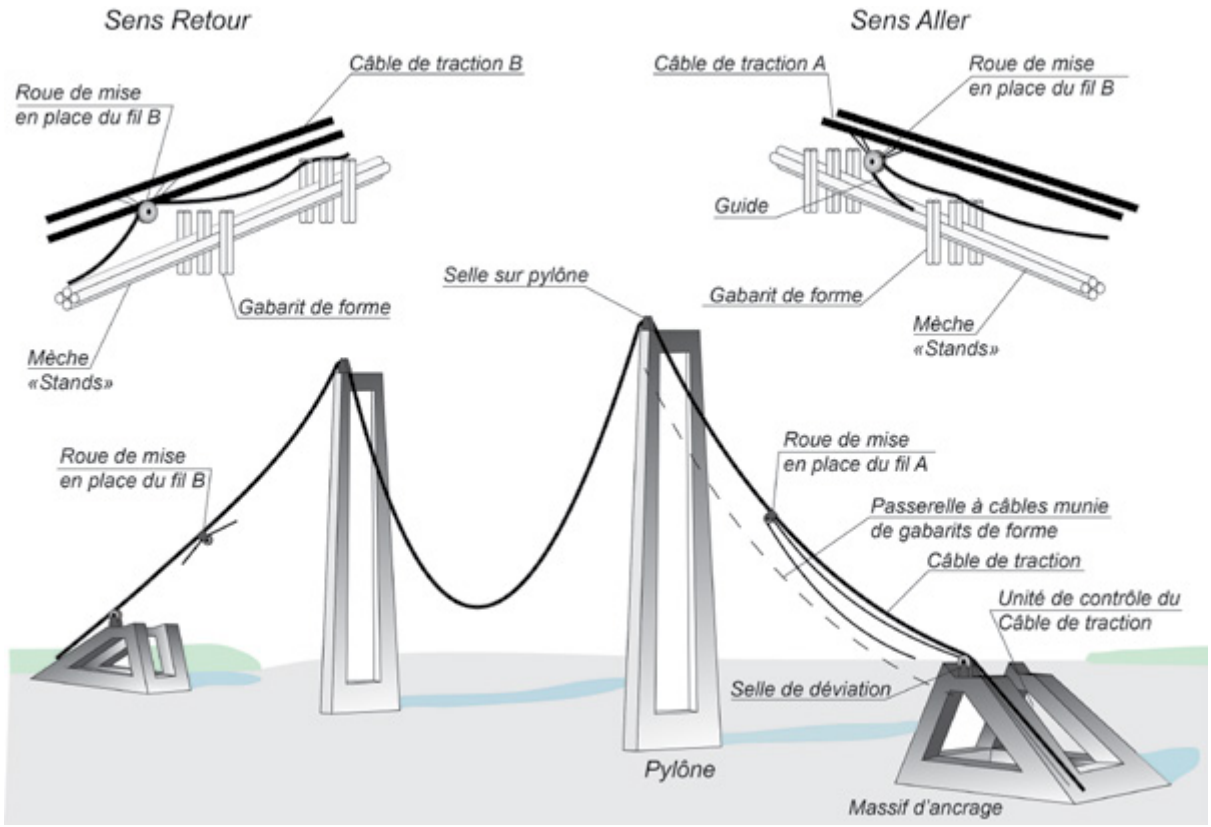


Figure 29 : Principe de construction des câbles à fils parallèles

3.1.3 - Câbles constitués de nappes ou de couronnes de torons élémentaires (ponts français de petite et moyenne portée)

Comme pour les câbles à fils parallèles de la première génération, cette technologie est le plus souvent réservée à des ouvrages de portée modeste, le poids de chaque toron constituant un câble élémentaire est réduit et permet d'utiliser des moyens de levage classiques pour le poser sur ses appuis et effectuer les réglages de longueur. Les torons élémentaires sont ancrés à leur extrémité avec des culots fixés à des barres d'ancrage filetées solidaires des massifs d'ancrage. La technique décrite au chapitre suivant peut aussi être utilisée.

3.1.4 - Câbles constitués de faisceaux

La technique des câbles constitués de faisceau est traditionnelle en France pour les ponts suspendus de moyenne ou grande portée. Elle est utilisée à l'étranger dans le cas de portées moyennes, les grandes portées étant réservées aux câbles à fils parallèles.

Comme dans le cas de câbles à fils parallèles de grande portée, on réalise des portiques provisoires en têtes de pylônes.

Ces opérations étant nécessaires à la maîtrise de la géométrie finale, les câbles sont prétendus en atelier, ce qui permet de mesurer leur module et de repérer les points particuliers (appuis sur selles et sellettes, attaches de suspentes) sous un état de contrainte donné.

Les câbles élémentaires sont généralement culottés en atelier et transportés sur des tourets en pleine longueur d'un ancrage à l'autre.

Les câbles élémentaires toronnés sont généralement lancés un par un à l'aide d'un système téléphérique, le faisceau se constituant donc progressivement. Ils peuvent être lancés suspendus à un câble porteur par des systèmes monocycles. Les torons élémentaires sont ancrés à leur extrémité avec des culots fixés à des barres d'ancrage filetées.

Comme dans le cas des grands câbles à fils parallèles, l'utilisation de passerelles provisoires à câbles ou « cat ways » et de gabarits provisoires a été retenue sur les ouvrages les plus récents dans la mesure où elle sécurise le travail des ouvriers et facilite la maîtrise de la géométrie transversale du faisceau. À la fin de son lançage, chaque toron

élémentaire est réglé pour se trouver à son emplacement définitif dans le faisceau et sur les selles d'appui. L'utilisation d'une passerelle provisoire à câbles permet aussi d'utiliser une glissière en forme de gouttière dans laquelle on fait passer le toron en cours de lancement. Une fois lancé d'un ancrage à l'autre, le toron est déplacé transversalement pour être positionné dans le faisceau puis réglé.

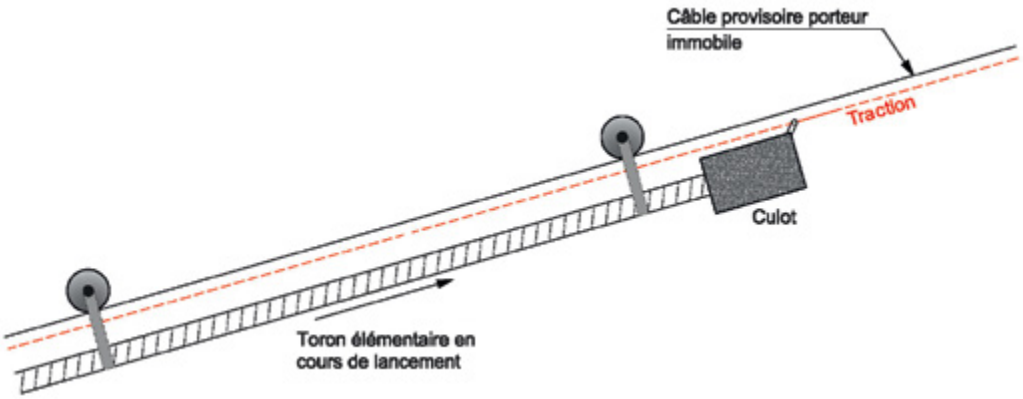


Figure 30 : Principe du lancement d'un câble élémentaire suspendu à un câble provisoire porteur

Figure 31 : Câble en cours de lançage toron par toron dans une passerelle à câbles ou cat ways

3.2 - Équilibre du câble seul

Le câble s'appuie sur les pylônes par l'intermédiaire de selles d'appui.

Lorsque le câble est seul, il exerce une pression de contact faible sur la selle d'appui. Pour éviter le glissement, il est alors nécessaire que l'effort de traction à gauche soit sensiblement égale à l'effort de traction à droite.

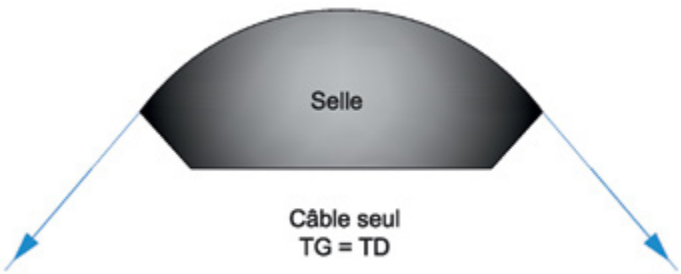


Figure 32 : Équilibre du câble seul (non chargé)

Un déséquilibre modéré peut être admis si l'on maîtrise le risque de glissement, par exemple avec des mordaches butées sur la selle.

3.3 - Équilibre du câble chargé par le poids du tablier

Lorsque l'ouvrage est terminé, on recherche un fonctionnement en compression simple des pylônes à la température de réglage (généralement dix ou quinze degrés). Ceci impose des composantes horizontales de l'effort de traction égales de part et d'autre des selles. Quand la pente est différente à gauche et à droite, ce qui est très fréquent, les tractions sont différentes dans le câble de part et d'autre de la selle. La différence est alors équilibrée par le frottement du câble sur la selle.

Figure 33 : Équilibre du câble chargé par le poids du tablier

3.4 - Les mouvements de selles

Lors de la construction du tablier, les câbles porteurs se chargent progressivement, ce qui provoque un déplacement progressif de la selle vers la travée centrale. À la fin de l'opération, la selle doit toutefois être centrée sur le pylône.

Sur les ponts de Tancarville et d'Aquitaine, les selles posées sur des rouleaux se déplaçaient vers le centre de la travée au fur et à mesure de la construction. Sur le pont d'Aquitaine, ce déplacement était de l'ordre de 60 cm. En fin de construction, les selles ont été fixées, les mouvements nécessaires en service étant compatibles avec la flexibilité des fûts des pylônes.

Sur les ouvrages de petites dimensions, il est possible de remplacer les mouvements de selles à la construction par une correction progressive de la position des culots d'ancrage des câbles porteurs ou par l'inclinaison initiale des pylônes vers l'extérieur dans le cas de selles fixes sur des pylônes articulés en pied.

4 - Modes de fonctionnement

On trouve dans ce chapitre des informations générales sur les spécificités du fonctionnement des ponts à câbles et plus particulièrement des ponts suspendus. Le lecteur à la recherche d'informations plus détaillées sur le fonctionnement de ces ouvrages pourra consulter l'annexe 4 de ce guide.

4.1 - Comparaison du fonctionnement du câble hauban et du câble porteur parabolique

4.1.1 - Le câble hauban

Le câble hauban est un câble chargé à ses extrémités. Il est généralement utilisé dans des structures triangulées.

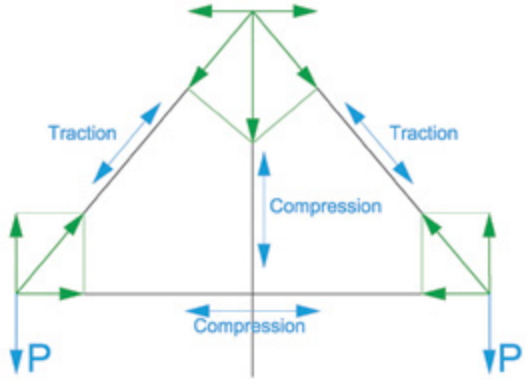


Figure 34 : Principe de fonctionnement de la structure haubanée

Dans le cas d'une structure triangulée, le changement de forme n'est possible qu'en changeant la longueur d'un côté du triangle.

Dans le cas de matériaux (imaginaires) inextensibles et incompressibles, la structure est strictement indéformable.

Les efforts horizontaux sont en général auto-équilibrés dans la structure, ce qui signifie la mise en compression de l'élément horizontal de tablier dans le schéma 31.

Les haubans réels sont réalisés avec des câbles pesants dont la géométrie d'équilibre est un arc de chaînette qui ne peut être strictement confondu avec le segment de droite reliant les deux points d'attache.

Le poids propre du hauban a donc deux conséquences :

- les forces sur les attaches ne sont pas dirigées selon la corde mais selon la tangente à l'arc de chaînette ;
- l'élément hauban est plus souple que le câble qui le constitue. Dans le cas d'une augmentation de la traction, à l'effet de l'allongement du câble s'ajoute un éloignement des deux points d'attache dû au changement de forme (réduction de la flèche).

Les non-linéarités introduites dépendent de la tension permanente du hauban et de sa portée horizontale.

4.1.2 - Le câble porteur (parabolique)

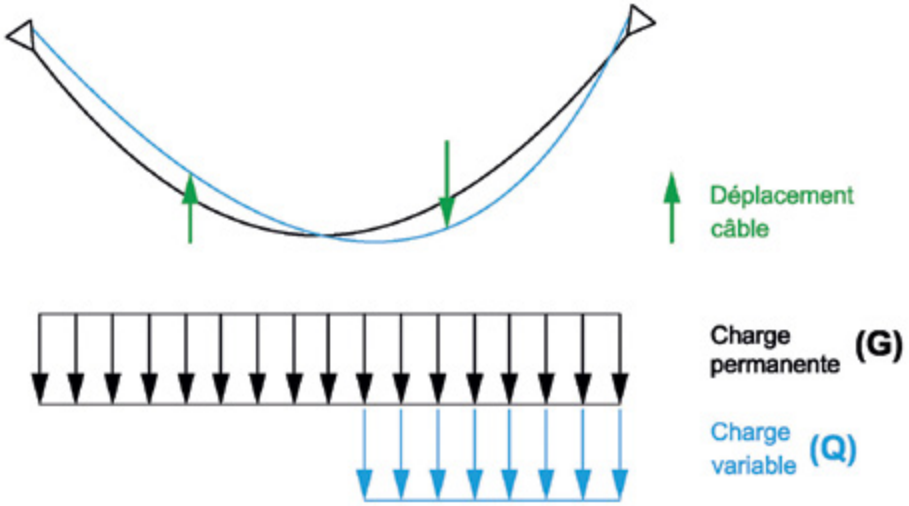


Figure 35 : Câble porteur parabolique. Adaptation au déplacement des charges variables

Le câble porteur est généralement utilisé avec une flèche importante de l'ordre du dixième de la portée pour les ponts. Il est chargé transversalement par l'intermédiaire des suspentes.

Dans le cas de charges variables, le câble adapte sa géométrie à chaque cas de charges mais celle-ci reste un funiculaire de chaque nouveau chargement. Le câble s'adapte par changement de forme.

Quand on applique les charges variables, le câble devient funiculaire de la somme des charges permanentes et variables. Sa nouvelle géométrie est constituée de deux arcs de paraboles tangents. Le câble descend dans la zone d'application des charges pour s'élever ailleurs. Pour une même charge variable, la déformée lors de son application est d'autant plus importante que les charges permanentes sont faibles.

Dans l'exemple du schéma n° 32, les charges permanentes constantes induisent une géométrie parabolique d'équilibre alors que quand on applique la charge variable, la géométrie d'équilibre est constituée de deux arcs de paraboles différents.

Les structures suspendues sont très souples et subissent de grands déplacements. Pour ces structures, il est nécessaire de tenir compte de l'influence de la déformation sur la distribution des charges. En effet, le comportement de l'ouvrage n'est plus linéaire, c'est-à-dire qu'il n'y a plus de relation de proportionnalité entre les chargements, les sollicitations et les déplacements. L'effet d'un chargement n'est plus indépendant des charges existantes à l'instant de son application.

En conclusion, le calcul d'un pont suspendu nécessite l'utilisation d'outils informatiques et de méthodes particulières prenant en compte les grands déplacements et la spécificité de comportement des câbles.

4.1.3 - Comparaison du hauban et du câble porteur parabolique

Le hauban chargé à ses extrémités étant utilisé avec une faible flèche dans des structures triangulées rigides, les efforts horizontaux peuvent en général s'auto-équilibrer (compression du tablier, équilibre en tête de pylône d'une travée à l'autre).

Le câble porteur, chargé transversalement, s'adapte aux variations de charges par changement de forme et grands déplacements. Il est intégré à des structures souples et sa traction doit être ancrée à ses extrémités.

4.2 - Fonctionnement d'un pont suspendu classique : association d'une poutre rigide en flexion et d'un câble porteur

L'allongement des suspentes est toujours négligeable par rapport aux mouvements verticaux du câble porteur et du tablier. L'erreur faite en assimilant les mouvements verticaux totaux à ceux du seul câble porteur est donc très faible.

4.2.1 - Ouvrage à vide à la température de réglage

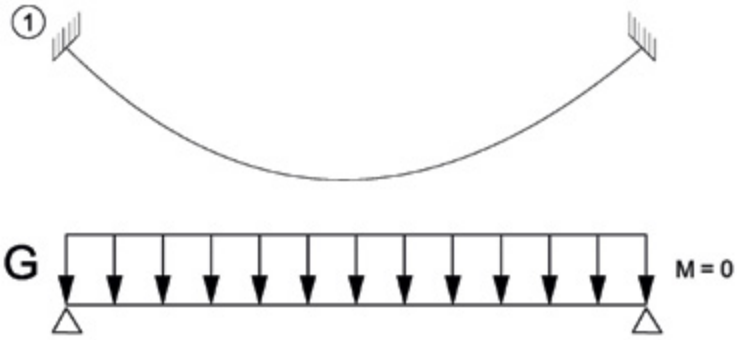


Figure 36 : Pont suspendu "à vide"

Dans l'ouvrage à vide à sa température de réglage, la charge est reprise par le câble. Les pylônes sont en compression simple.

Le moment dans la poutre de rigidité est nul (à l'exception des moments locaux entre deux suspentes).

4.2.2 - Charge de la totalité de la travée avec les charges variables

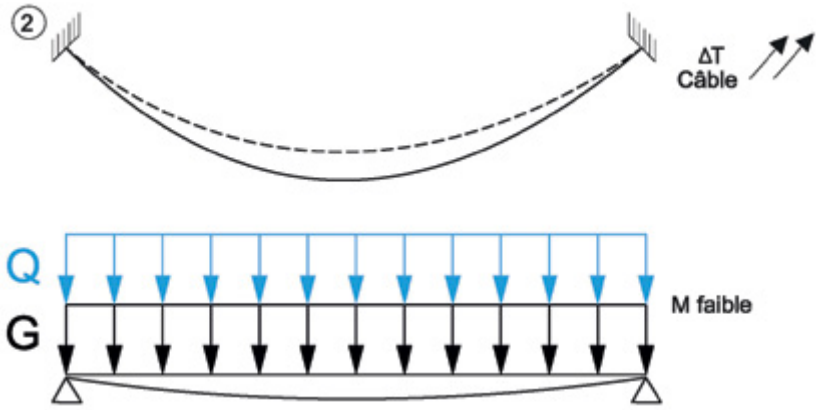


Figure 37 : Pont suspendu chargé sur toute sa longueur

Si l'on place une charge d'exploitation linéique sur une travée entière, le funiculaire de la charge appliquée au câble ne change pratiquement pas, la tension du câble augmente et celui-ci s'allonge légèrement.

Le moment de flexion dans la poutre de rigidité est très faible.

4.2.3 - Charge partielle de la travée avec les charges variables

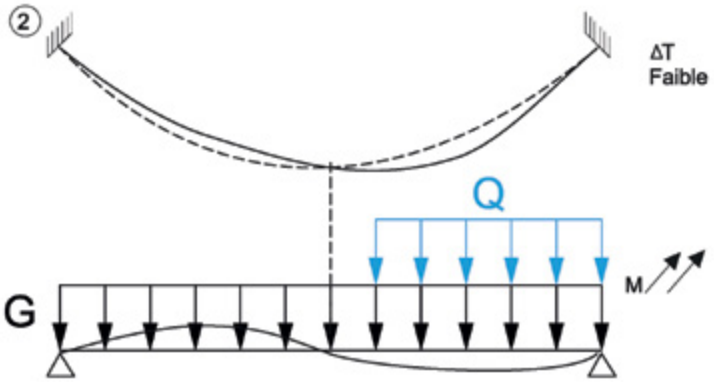


Figure 38 : Pont suspendu chargé partiellement

Si l'on place une charge linéique partielle Q sur une travée, le funiculaire de la charge appliquée au câble est modifié. La variation de traction dans le câble reste modérée mais celui-ci adapte sa forme et la poutre fléchit.

Les déplacements verticaux deviennent significativement plus importants.

4.2.4 - Possibilité d'ajustement de la souplesse inhérente au principe de suspension

La rigidité de flexion verticale peut être considérablement augmentée en ajoutant des haubans (suspension hybride) ou en utilisant des suspentes inclinées créant une triangulation. L'ouvrage se comporte alors comme un pont suspendu sous charges permanentes et comme une poutre triangulée sous charges variables. Cette dernière disposition complique toutefois la conception des attaches et le montage du tablier.

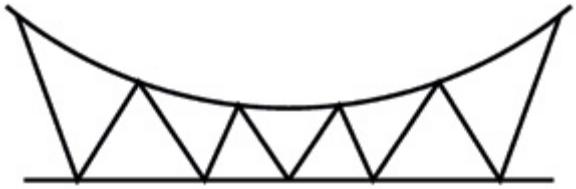


Figure 39 : Principe de suspentes inclinées formant triangulation

Cette disposition, qui rigidifie la structure en flexion dans son plan vertical, peut être favorable vis-à-vis du comportement dynamique au vent (pont sur la rivière Humber (Angleterre) de 1 410 m de portée centrale) mais aussi, sur des ouvrages plus légers, vis-à-vis des sollicitations dynamiques dues aux piétons.

Il est possible d'augmenter la rigidité d'un pont suspendu d'une des manières suivantes :
- augmenter la traction dans le câble porteur (réduire la flèche, augmenter la charge permanente, ajouter une suspension antagoniste) ;
- augmenter la rigidité de la poutre (en restant vigilant sur le partage des efforts) ;
- ajouter des haubans à proximité des pylônes (zones où leur inclinaison les rend efficaces) ;
- placer des suspentes inclinées (triangulation).

Figure 40 : Suspentes inclinées

Figure 41 : Suspension antagoniste

4.3 - Travées multiples, pylônes massifs et câbles de tête

Dans le cas de travées multiples, la nécessité d'équilibrer les charges horizontales au niveau des appuis des câbles peut poser certaines difficultés.

Sous charges permanentes, les tractions s'équilibrent généralement d'une travée à l'autre.

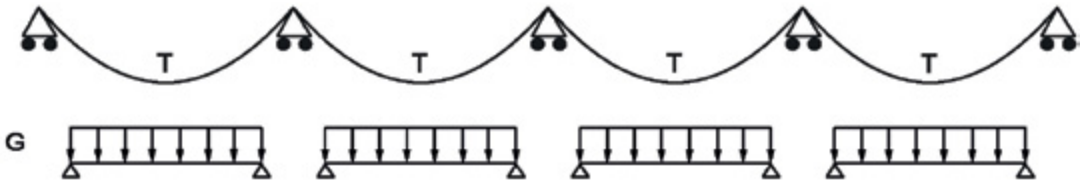


Figure 42 : Travées suspendues multiples sous charges permanentes

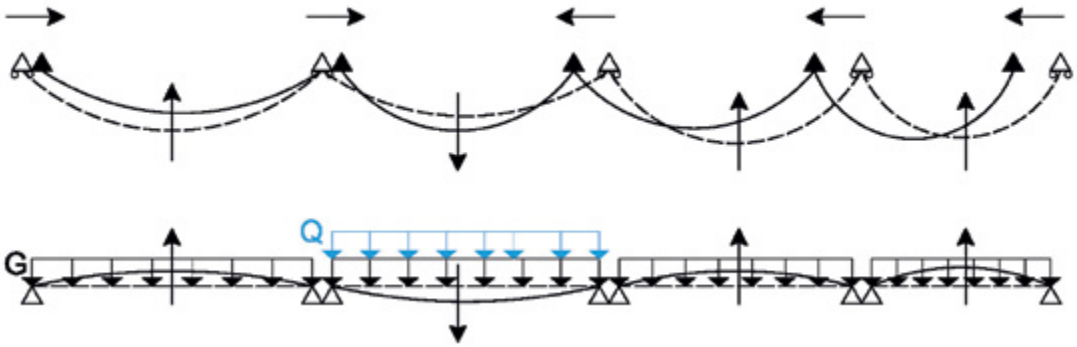


Figure 43 : Travées suspendues multiples avec chargement de la seconde travée

Quand on charge une travée sans charger les travées voisines, les déplacements des appuis de câbles nécessaires à l'obtention d'un nouvel équilibre sont, en particulier dans le cas de tabliers légers, incompatibles avec le fonctionnement de la structure ou son utilisation normale.

Deux solutions sont classiquement utilisées pour répondre à ce problème :

- l'utilisation de pylônes massifs ;
- l'utilisation de câbles de tête.

4.3.1 - Utilisation de pylônes massifs

Une première réponse peut être constituée par l'adoption de pylônes massifs, une solution qui a été utilisée dans les ponts suspendus de première génération. La longueur modeste des travées permettait de limiter le déséquilibre des tractions en tête de pylône. Chaque câble porteur était alors redescendu verticalement le long du pylône où il est ancré, le frottement des câbles sur la tête de pylône diminuant l'effort aux ancrages. On parlait alors de câbles de briquet.

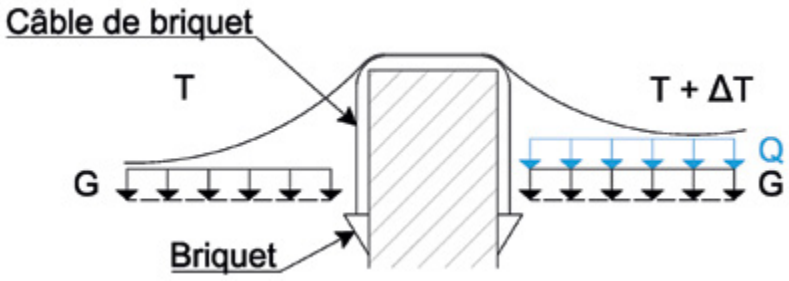


Figure 44 : Ancrage des câbles de briquet sur une pile massive

Les pylônes sont fléchis, ce qui exige des formes massives peu économiques lorsque la longueur des travées augmente, le dimensionnement devient impossible pour les grandes travées.

4.3.2 - Utilisation de câbles de tête

Une autre possibilité permettant de gérer les déséquilibres des efforts de traction dans les câbles d'une travée à l'autre consiste à utiliser des câbles de tête.

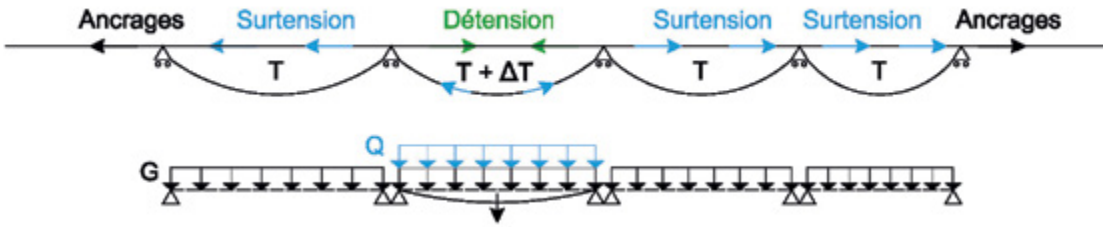


Figure 45 : Rôle des câbles de tête en cas de chargement de la seconde travée

Les câbles de tête permettent de maintenir les déplacements à des niveaux acceptables. Ils se détendent au-dessus des travées chargées et se tendent au-dessus des autres, ces variations de traction intervenant dans les équilibres de chariots d'appui et permettant d'atteindre les équilibres avec des déplacements beaucoup plus faibles.

Le réglage des câbles de tête consiste à trouver la traction minimale permettant le fonctionnement de la structure sans détension de ceux-ci. Cette option est optimale pour le dimensionnement des câbles de tête, des câbles de retenue et des massifs d'ancrage.

Il est important de noter que les câbles de tête font partie intégrante de la suspension et que, en provoquant l'échappement d'un chariot d'appui, la rupture d'un de ces câbles peut entraîner la ruine de l'ouvrage.

Figure 46 : Pont à câbles de tête

4.4 - Conséquences du fonctionnement spécifique des ponts suspendus sur les calculs structurels

Les ponts suspendus s'adaptent à l'application des charges variables par grands déplacements ce qui entraîne les conséquences suivantes :

- l'influence des changements de forme de la structure ne peut pas être négligée ;
- le comportement structurel n'est plus, comme dans les structures usuelles, linéaire (perte de la proportionnalité entre charges, déformations et déplacements) ;
- l'effet de chaque chargement dépend de l'état de la structure (température, charges, déformée, et sollicitations) au moment où on l'applique ;
- les calculs doivent prendre en compte les grands déplacements, la spécificité de l'élément câble (fonctionnement en traction pure) et le réglage de la structure. Ils ne peuvent être effectués avec un logiciel de calcul de structures standard.

5 - Appuis : piles, culées, massifs et chambres d'ancrage

Comme dans la plupart des structures de génie civil, le bon comportement des fondations des ponts suspendus est vital pour la structure car il faut reprendre les efforts appliqués avec des déformations suffisamment faibles pour ne pas altérer le fonctionnement de l'ouvrage.

Par ailleurs, les ponts suspendus servant principalement à franchir des cours d'eau, le risque lié aux affouillements doit être appréhendé avec le plus grand soin.

Pour plus de précisions concernant les fondations, on se reportera aux fascicules 10 et 12 de l'ITSEOA.

Hormis dans le cas des ponts suspendus auto-ancrés où la mise en compression du tablier équilibre la composante horizontale de la traction des câbles porteurs, les ponts suspendus nécessitent à leurs extrémités des ancrages qui diffusent dans le sol l'effort de traction des câbles porteurs.

Les dispositions concernant les massifs et chambres d'ancrage, qui sont très variées d'un ouvrage à l'autre, sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

Le lecteur intéressé trouvera des informations plus détaillées sur ce sujet dans l'annexe 4 de ce guide.

L'attention du gestionnaire est attirée sur les conceptions géométriques très variées des massifs d'ancrage et sur l'existence possible de parties enterrées vitales pour la structure.

Figure 47 : Massifs d'ancrage

5.1 - Ancrage sur pylônes massifs

L'ancrage sur pylônes massifs a été adopté sur les ponts légers comme les premiers ponts construits par Seguin de 1825 à 1840.

L'ancrage pouvait s'effectuer sur un pylône intermédiaire comme exposé plus haut. Le pylône supporte alors la charge horizontale correspondant au déséquilibre de traction entre les câbles de travées voisines.

L'ancrage pouvait aussi s'effectuer sur un pylône d'extrémité, le dispositif reprenant alors tout l'effort de traction du câble.

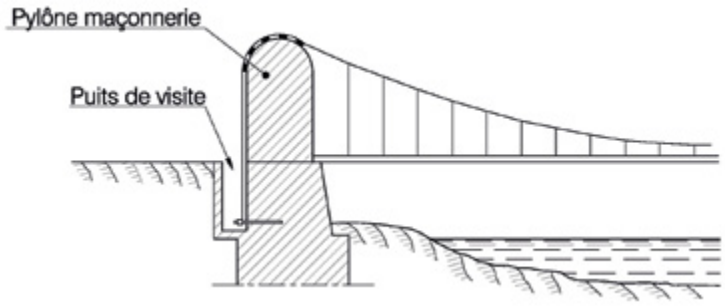


Figure 48 : Ancrage sur un pylône massif

Dans ce cas, ce pylône supporte la composante horizontale de la traction des câbles ce qui le fléchit. La poussée au vide du câble apporte une précontrainte des maçonneries et l'effet de courroie mobilisé par la déviation des câbles diminue beaucoup la traction dans leur partie verticale et sur le briquet.

Dans le cas d'un pylône intermédiaire, l'effort horizontal introduit dans le pylône correspond simplement aux variations de la composante horizontale de traction due aux différences de chargement de deux travées voisines.

5.2 - Ancrage sur massifs poids

On a très rapidement recherché un ancrage des câbles porteurs à l'arrière des pylônes et celui-ci a le plus souvent été réalisé à l'aide d'un massif poids.

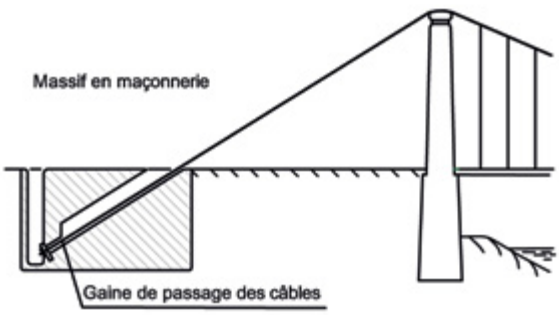


Figure 49 : Ancrage dans une galerie d'un massif poids

Figure 50 : Exemple de massif poids

Figure 51 : Galerie de visite dans un ancrage

Figure 52 : Ancrage des câbles dans le massif

Ce massif était initialement réalisé en maçonnerie. Les câbles plongeaient dans des galeries pour être ancrés dans des chambres accessibles par des puits de visite verticaux ou par des portes d'accès.

On a communément employé au XIX^{e} siècle des galeries semi circulaires servant d'appui aux câbles de retenue qui étaient donc mécaniquement continus entre l'amont et l'aval. Le transfert d'efforts de l'amont vers l'aval était réalisé avec des câbles secondaires ou des barres filetées. L'appui des câbles s'effectuait par l'intermédiaire de pièces moulées en forme de sellettes.

La stabilité du massif étant basée sur le frottement mobilisable entre sa face inférieure du massif et le sol support, elle est directement dépendante de la géométrie et du poids.

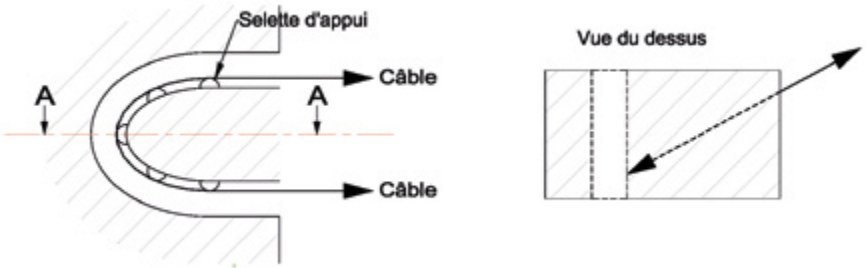


Figure 53 : Ancrage par appui direct des câbles dans une galerie

L'ancrage des câbles étant initialement placé au fond de galeries, ces zones souvent humides ont entraîné une corrosion rapide des ancrages, ce qui a conduit aux adaptations suivantes :

- remplacement des câbles par des barres filetées dans les zones humides ;
- sortie des culots d'ancrage des câbles à l'extérieur des massifs dans des zones bien ventilées ;
- remplissage des galeries et des puits avec du béton (en noyant les barres filetées dans du béton).

Lors d'un recalcul, il convient de prendre en compte les risques de déjaugeage lors des crues qui diminuent notablement la capacité des massifs. Il convient également de négliger la butée à l'avant du massif car la mobilisation de celle-ci nécessite des déplacements importants. Il paraît en revanche raisonnable de compter une contre-poussée équilibrant la poussée à l'arrière du massif si celui-ci est enterré ou semi-enterré ainsi que du frottement sur les parties latérales dans le cas de massifs enterrés.

5.3 - Utilisation d'une butée sur la fondation du pylône

La fondation des pylônes étant fortement chargée, elle peut supporter par frottement un effort horizontal intense. Sur certains ponts, cette capacité a été utilisée pour appuyer les massifs d'ancrage sur la fondation du pylône par l'intermédiaire de butons ou d'un massif de jonction.

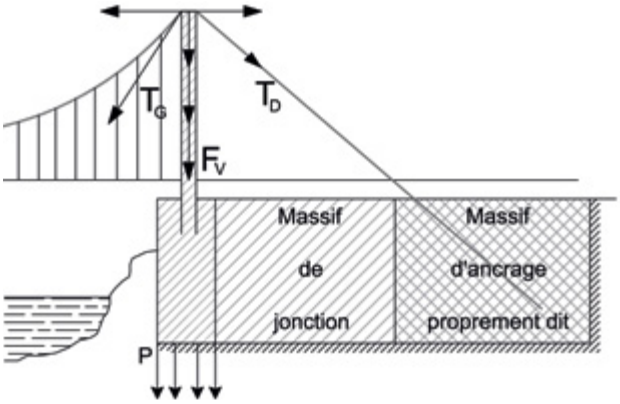


Figure 54 : Massif de jonction servant d'appui sur le pylône

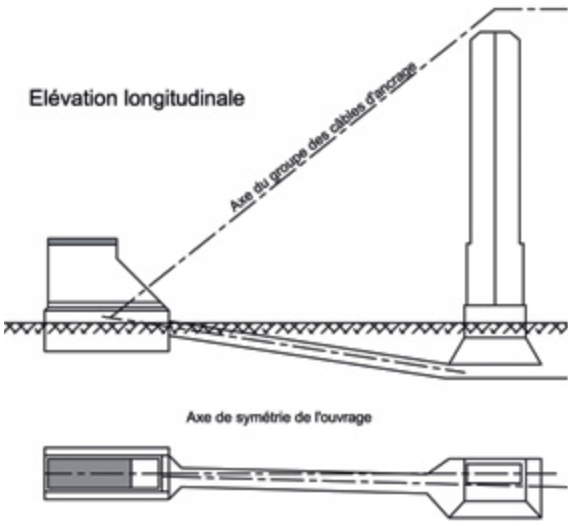


Figure 55 : Buton d'appui sur le pylône

5.4 - Ancrage direct dans le rocher

La méthode de bouclage des câbles dans une galerie semi circulaire, utilisée dans les massifs poids en maçonnerie, a été appliquée directement dans le rocher quand celui-ci était accessible et de bonne qualité mécanique.

On a donc réalisé des galeries de différentes formes permettant de transmettre l'effort de traction des câbles porteurs au rocher.

Figure 56 : Ancrage par enroulement autour d'un massif

5.5 - Utilisation de tirants dans le sol

L'apparition des tirants, éléments actifs en barres ou câbles, ancrés dans le sol a permis de réaliser des massifs d'ancrages économiques mobilisant une masse importante de sol.

Dans le cas d'ouvrages modestes ou de passerelles, on réalise de petits massifs en béton qui assurent le transit des efforts entre les têtes des ancrages et les barres filetées destinées à attacher les culots.

Pour les ouvrages plus importants, des chambres d'épanouissement enterrées sont réalisées.

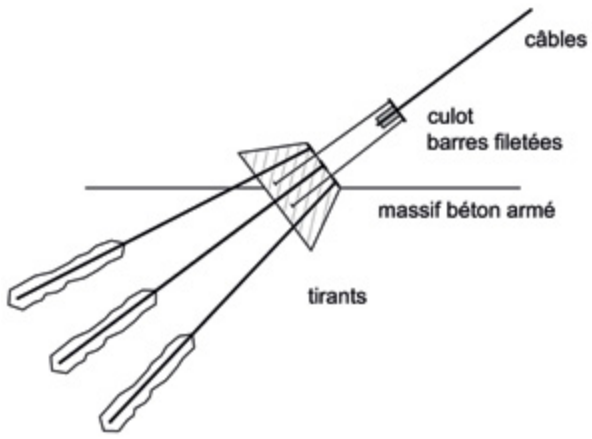


Figure 57 : Massif d'ancrage par tirants

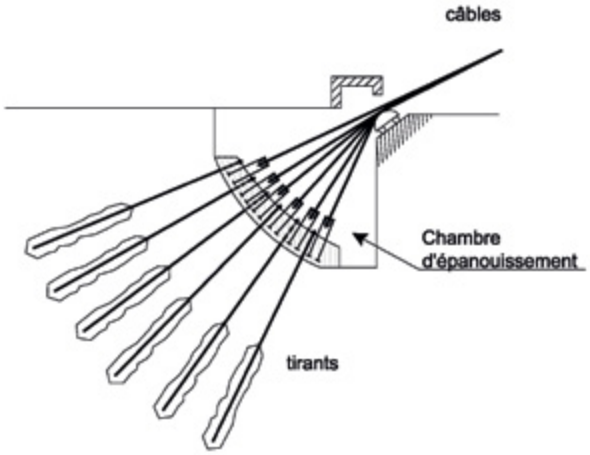


Figure 58 : Massif d'ancrage par tirants (ouvrage important)

Au fond des chambres d'ancrage servant aussi à l'épanouissement des torons élémentaires, de puissantes pièces en béton sont ancrées au sol par des tirants. Les culots d'ancrage des câbles porteurs y sont fixés, après épanouissement des torons élémentaires, par l'intermédiaire de culots et barres filetées.

Cette conception est toutefois controversée. L'ancrage des câbles porteurs est une fonction vitale pour la structure et il convient de prendre certaines précautions vis-à-vis de la conception, du contrôle et de la possibilité de remplacement des tirants ancrés dans le sol. Les tirants devront être régulièrement contrôlés.

Ces raisons poussent certains concepteurs et maîtres d'ouvrage à préférer aux tirants des micropieux qui peuvent fonctionner de manière permanente en traction et sont beaucoup moins sensibles à la corrosion.

Il est bien entendu également possible d'utiliser le poids, comme dans les conceptions anciennes.

Il est enfin possible de coupler ces techniques.

5.6 - Fixations des barres d'ancrage au massif

Dans les solutions classiques, pour les ponts de moyenne portée, les massifs sont des massifs poids en béton armé (parfois avec des rails de chemin de fer) et les barres d'ancrage des culots traversent les massifs pour transférer l'effort de traction à l'arrière d'une poutre de répartition noyée.

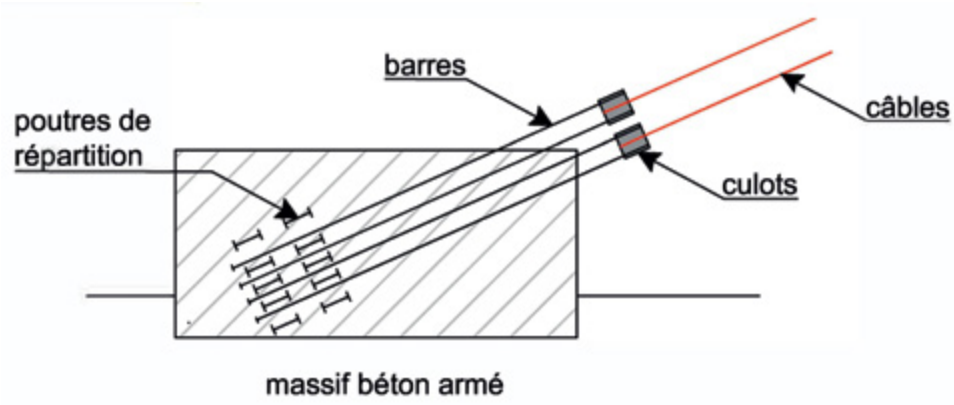


Figure 59 : Principe de fixation des barres à l'arrière d'un massif poids

On trouve aussi dans des ouvrages modestes une charpente métallique noyée dans le massif et chargée de répartir l'effort de traction apporté par les câbles. Les culots d'ancrage des câbles élémentaires constituant les câbles porteurs sont alors fixés à des étriers appuyés sur des axes horizontaux transversaux traversant des éléments de charpente.

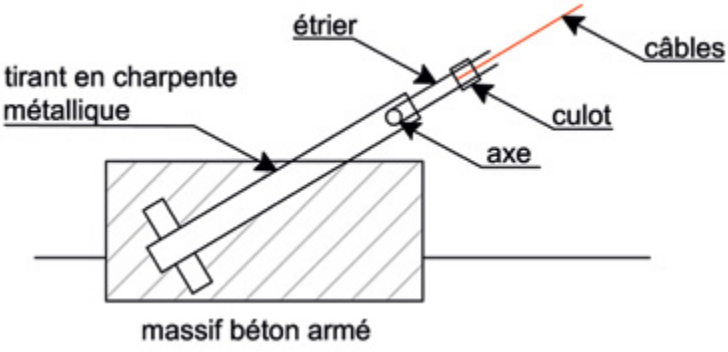


Figure 60 : Fixation des câbles par une pièce de charpente métallique

Figure 61 : Ancrage à une pièce de charpente par l'intermédiaire d'axes et d'étriers

Dans de grands ouvrages plus récents, l'effort de traction peut être transféré à l'arrière du massif avec des éléments tendus en béton précontraint.

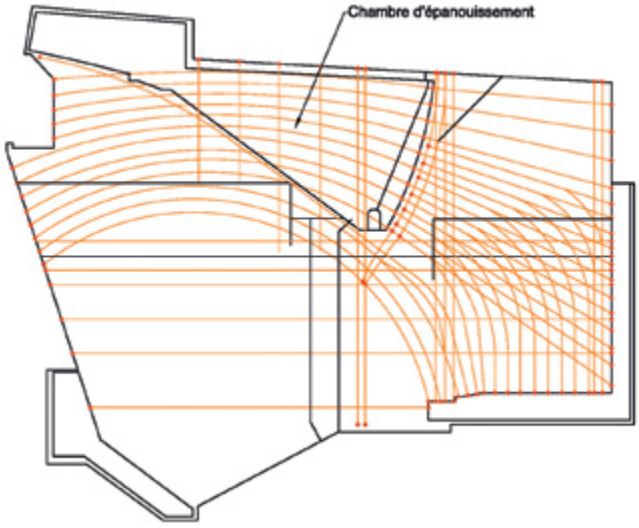


Figure 62 : Exemple de la précontrainte du massif d'ancrage rive gauche du pont de Tancarville

6 - Suspensions

La suspension est composée principalement :

- de câbles dont les éléments constitutifs sont des fils dont le diamètre est généralement compris entre 4 et 5 mm ; ces câbles peuvent être de différents types : à fils parallèles, torsadés, mono ou multi torons multi couches (clos ou non) ;
- de suspentes de liaison entre les câbles et le tablier : ces suspentes peuvent être constituées soit de barres, soit de câbles dont les fils élémentaires ont un diamètre de l'ordre de 4 à 5 mm pour les suspentes à brin unique et de 2,5 mm pour les suspentes à deux brins qui passent au-dessus des colliers.

On constate une grande évolution des caractéristiques des fils au cours des deux siècles d'histoire des ponts suspendus. Ces fils sont très majoritairement utilisés en France sous forme de torons multicouches à torsion alternative, eux-mêmes utilisés dans des dispositions géométriques variées (en nappes, en couronnes ou en faisceaux).

La constitution des suspentes et de leurs attaches ainsi que des systèmes d'appui de câbles fait l'objet de dispositions très variées et de solutions technologiques multiples.

Le lecteur à la recherche d'informations plus détaillées sur les organes de suspension pourra consulter l'annexe 5 de ce guide.

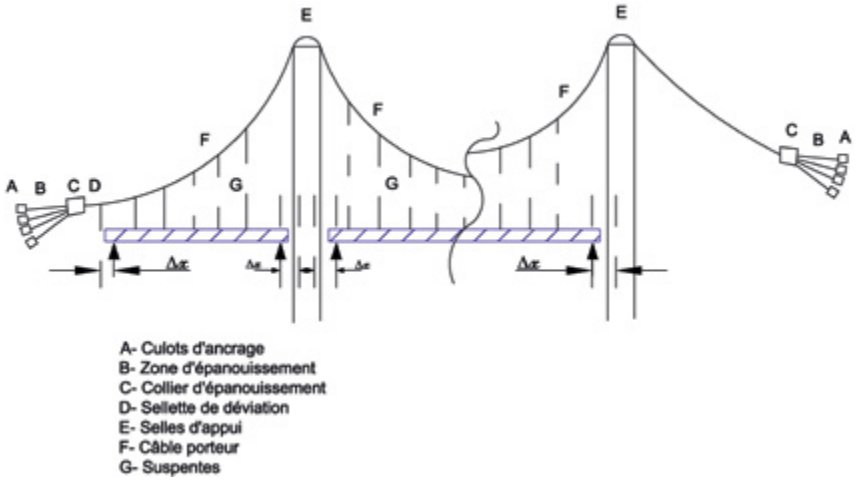


Figure 63 : Différents organes constituants la suspension

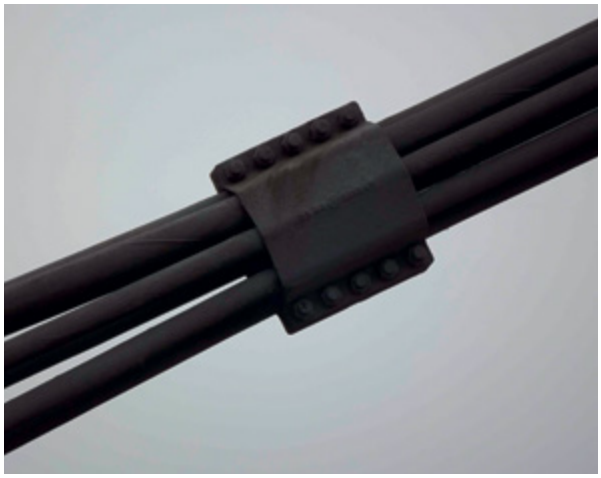


Figure 64 : Colliers d'épanouissement

Figure 65 : Ancrage des torons élémentaires

6.1 - Colliers d'épanouissement

Les efforts centrifuges dus aux poussées au vide induites par la déviation des câbles peuvent être intenses et ces pièces sont donc à manipuler avec précaution. Leur ouverture ne peut être envisagée qu'après avoir conçu et réalisé des mordaches spéciales munies de vérin permettant la reprise des efforts de déviation et les réglages géométriques. La procédure de remontage est à étudier avec soin avant toute ouverture.

6.2 - Appuis du câble porteur : selles et sellettes

Les déplacements du câble porteur au niveau de ses appuis intermédiaires sont nécessaires et inévitables. Ces déplacements peuvent être assurés soit par le déplacement de la selle ou sellette sur son support, soit par le déplacement du support.

Traditionnellement, les déplacements des selles ou sellettes sur le support étaient assurés par des appuis à rouleaux en acier plein.

Sur les ouvrages plus récents, on trouve les solutions suivantes :

- appuis à rouleaux. Le concept a été modernisé : les pistes de roulement et les rouleaux sont en acier inoxydable et les rouleaux sont des tubes dont la souplesse radiale permet d'homogénéiser les charges entre rouleaux. La selle est munie de jupes en caoutchouc qui évitent la pollution de la zone de roulement. On ne bénéficie pas encore de retours sur les quelques réalisations effectuées selon ces principes ;
- appuis sur une surface de glissement téflon/inox. Cette disposition est classique depuis des années dans les appareils d'appui à pot glissants. Elle est robuste et bien maîtrisée ;

- appui sur un appareil en caoutchouc fretté. Quand l'emploi d'un appareil d'appui en caoutchouc fretté est possible (charges modérées et déplacements limités), cette option peut constituer une solution rustique et robuste au problème posé.

Dans tous les cas, il convient d'être très attentif aux risques d'échappement des selles ou sellettes (qui conduiraient à la ruine de l'ouvrage). Sur ce point, l'utilisation systématique de butées de sécurité longitudinales et transversales est recommandée.

Traditionnellement, on trouve des appuis à rouleaux et, sur les grands ouvrages, des béquilles appuyées en pied sur un grain d'appui.

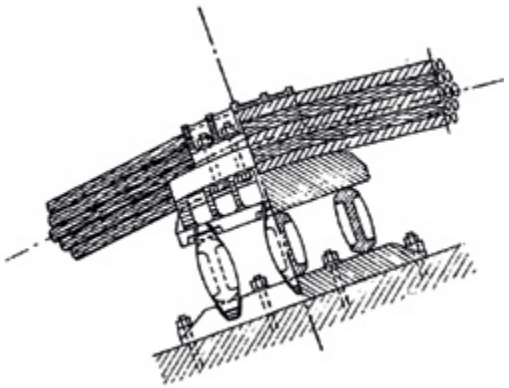


Figure 66 : Appuis sur rouleaux

Figure 67 : Exemple de sellette de déviation sur bielle d'appui suivie d'un collier d'épanouissement

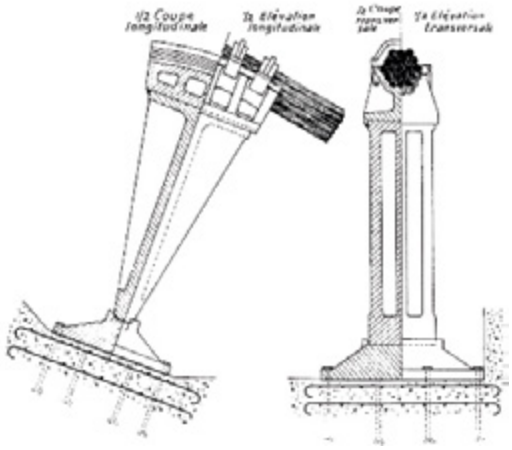


Figure 68 : Appui sur une béquille articulée en pied

6.3 - Ancrages et organes d'attache des extrémités de câbles porteurs et suspentes en câbles

Les câbles élémentaires et les suspentes modernes sont le plus généralement fixés à leurs extrémités par l'intermédiaire de pièces appelées culots. On utilise de manière classique dans les ponts des culots dans lesquels on coule un cône métallique (depuis quelque temps, on effectue aussi des culottages à la résine, cette dernière méthode étant obligatoire en cas de gaine extrudée en PEHD qui serait brûlée par un métal en fusion).

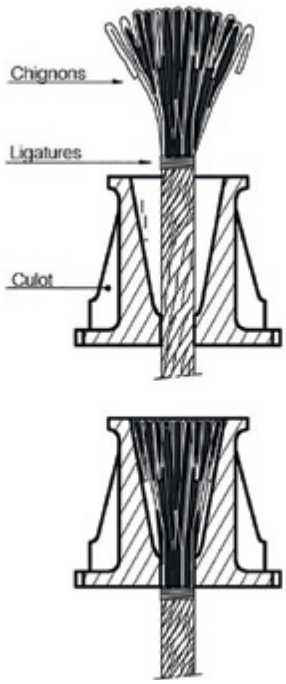
Un culot bien conçu et réalisé dans de bonnes conditions est très efficace. Il peut transmettre 100 % de la capacité à rupture du câble et présente une bonne endurance.

Dans les ouvrages légers et pour des câbles de petit diamètre, il a été utilisé des culots ou douilles sertis à la presse. Ces dispositifs ne supportent pas forcément la charge de rupture du câble et leur efficacité statique dépend du dispositif, de leur diamètre et de leur mise en œuvre. Leur endurance est également plus faible que celle des culots avec cône métallique ou en résine. Leur capacité est habituellement établie sur la base de campagnes d'essais. À titre indicatif, des rendements, c'est-à-dire la capacité à la rupture de l'attache divisée par la capacité à la rupture du câble, de 0,85 à 0,95 sont souvent évoqués.

Les culots en acier moulé comportent le plus souvent des oreilles permettant de les fixer avec un écrou sur les barres d'ancrage.

Les culots modernes sont plus souvent mécanosoudés, la partie cylindrique contenant le cône de blocage du câble s'appuyant alors sur une plaque soudée à la douille qui transmet l'effort aux barres d'ancrage (dans des cas plus rares, la douille est simplement appuyée sur un chevêtre).

Le mode opératoire du culottage



Le culottage des câbles s'effectue en plusieurs opérations :

- pose des ligatures dont une se trouvera en un point bas situé sous le culot ;
- préparation du câble en chignon (ou perruque). Cette opération consiste à détoronner la partie du câble située au-dessus de la dernière ligature, à mettre les fils en gerbe régulière et à retourner l'extrémité de chaque fil à l'intérieur du chignon (ce retournement n'est pas imposé dans la norme NF EN 13411-4) ;
- enfoncement du chignon dans son logement par traction au vérin ;
- chauffage du culot pour éviter le refroidissement trop rapide du métal fusible et remplissage de la cavité.

Figure 69 : Principe du culottage

Le culottage peut être réalisé en usine ou, sous certaines conditions, sur chantier.

Un culottage de qualité nécessite un maintien rigoureux de l'axe culot-câble et donc un réglage précis d'une longueur droite suffisante du câble dans l'axe du culot. La courbure du câble doit être limitée pour les mêmes raisons (30 diamètres est un bon ordre de grandeur). Cette opération est exigeante, elle nécessite d'utiliser un échafaudage et mobilise une longueur significative de câble. Ces contraintes peuvent être très pénalisantes dans le cas de reculottage de câbles existants. On peut alors utiliser des coffrages et reculotter en conservant le culot dans une position inclinée.

Figure 70 : Douilles et leur cône de zinc

6.4 - Les barres et étriers d'ancrage – matériaux et filetage

Sur les ouvrages anciens, les barres et étriers d'ancrage étaient réalisés en acier mi-dur de type XC 38 par exemple. Ils étaient utilisés à l'état brut de laminage ou de préférence après un traitement de normalisation. Les extrémités étaient filetées et les filets étaient taillés (réalisés avec enlèvement de matière).

On a aussi utilisé des barres en acier de construction E36-3 comportant des extrémités avec des filetages roulés. Ces aciers ont une meilleure résilience que les aciers mécaniques et les filets roulés sont moins sensibles que les filets taillés au risque de fissuration en fond de filet (dans les filetages roulés, les fibres nées du laminage ne sont pas coupées par l'usinage). Cette solution est donc nettement meilleure vis-à-vis de la résistance à la fatigue et du risque de rupture fragile.

On utilise actuellement des aciers de construction modernes (suivant les diamètres S355K2+N, S355N ou M, S355NL ou ML et éventuellement des S420M ou ML) et les filets sont roulés.

Les étriers nécessitent un formage de la barre qui peut être effectué à froid ou à chaud. Cette opération peut être accompagnée d'un traitement thermique. Le formage peut conduire à une diminution des propriétés mécaniques (réduction de ductilité) de la barre s'il n'est pas correctement effectué.

Figure 71 : Culots mécano soudés attachés directement sur les barres d'ancrage

Figure 72 : Culots mécano soudés : chevêtres et barres d'ancrage

Figure 73 : Culots moulés et leurs barres d'ancrage

7 - Pylônes

Les pylônes, qui sont les organes d'appui des câbles, comportent un fût par nappe. Les deux fûts sont souvent entretoisés afin d'assurer la stabilité transversale (vent et instabilités élastiques).

7.1 - Les différents types de pylône

Les appuis des câbles doivent pouvoir se déplacer longitudinalement.

Cette contrainte peut être respectée d'une des manières suivantes :

- chariot mobile sur pylône rigide ;
- pylône articulé en pied ;
- pylône souple.

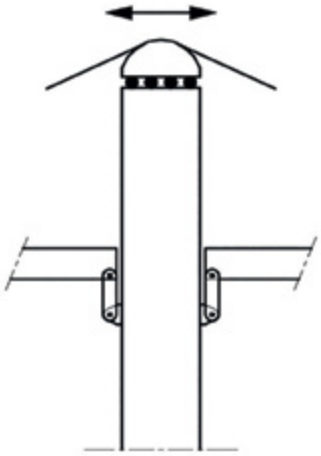


Figure 74 : Principe du chariot mobile

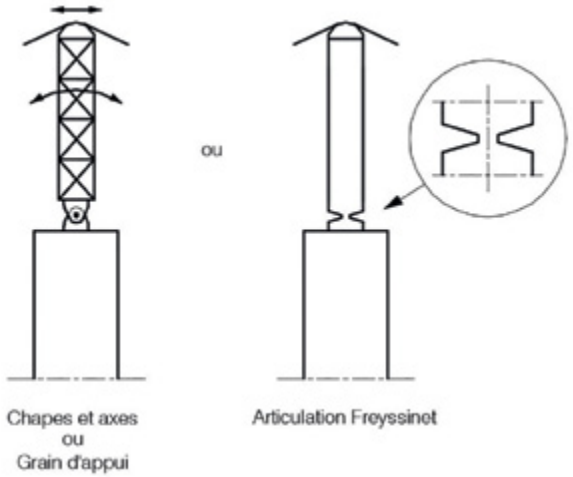


Figure 75 : Appui mobile sur un pylône rigide (chariot d'appui sur rouleaux)

Figure 76 : Appui fixe du câble sur un pylône articulé en pied

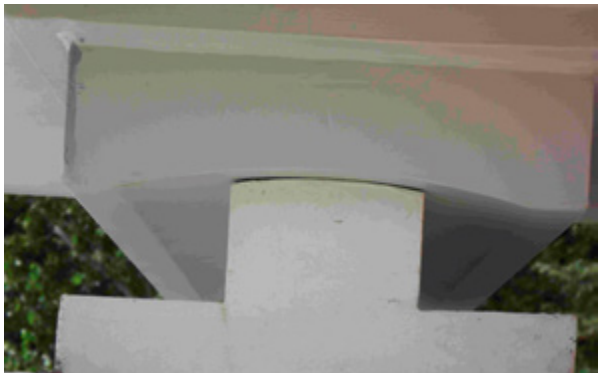


Figure 77 : Pylônes métalliques articulés sur grain ou genouillère

Figure 78 : Pylônes articulés sur un axe

Figure 79 : Pylônes en béton avec articulation Freyssinet

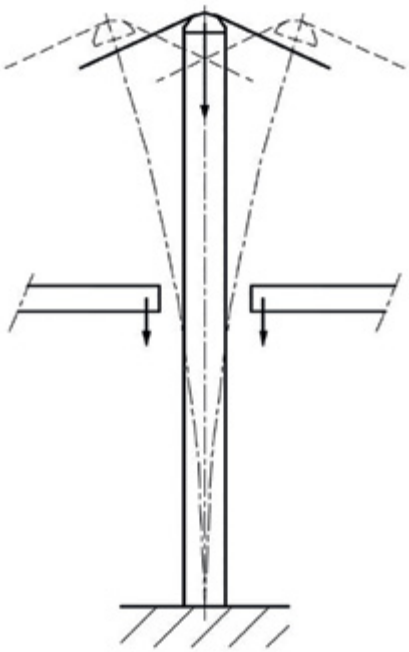


Figure 80 : Appui fixe du câble sur un pylône souple encastré en pied. Exemple des pylônes souples du pont d'Aquitaine

La souplesse des pylônes est couramment utilisée sur les grands ponts à pylônes en béton armé de grande hauteur (Tancarville, Aquitaine). Le point d'encastrement est généralement situé au-dessous du tablier et la souplesse du pylône permet le déplacement de l'appui du câble avec un effort de rappel faible. La stabilité du pylône doit être justifiée en prenant en compte les actions apportées par le câble mais aussi par le tablier. La souplesse nécessaire à ce type de fonctionnement pouvant être incompatible avec la reprise des efforts longitudinaux apportés par le tablier, ceux-ci doivent alors être transférés sur les culées (c'est le cas du pont d'Aquitaine). La possibilité d'un déplacement différentiel entre les deux fûts devant être considérée, l'entretoise transversale doit être assez souple dans le sens longitudinal pour supporter les effets de ce tassement. Les grands déplacements des appuis de câbles nécessaires à la construction étaient le plus souvent assurés par une mobilité provisoire des selles (organe d'appui des câbles sur le pylône) qui ne sont fixées en tête de pylône qu'à la fin de la construction.

7.2 - Les matériaux utilisés

7.2.1 - La maçonnerie

Initialement les pylônes étaient en maçonnerie. L'appui du câble pouvait être un rouleau unique (dans le cas de câbles à fils parallèles), la liberté longitudinale de l'appui étant alors assurée de manière permanente. Le déplacement a été ensuite assuré par des chariots s'appuyant sur des rouleaux multiples. Ces dispositifs se sont généralement rapidement grippés et les déplacements nécessaires (et généralement inéluctables) ne peuvent alors se produire qu'en mobilisant la souplesse du pylône. Le résultat de ce blocage dépend de la demande en déplacement (géométrie et type de suspension) et de la souplesse réelle des pylônes. Dans les cas défavorables (pylônes massifs avec demande importante de déplacement), on peut constater des fractures de décompression et dans les cas les plus graves, des ruptures de maçonnerie.

Figure 81 : Pylônes en maçonnerie avec appuis des câbles sur rouleaux

On a aussi construit des pylônes métalliques. Ceux-ci étaient généralement articulés en pied et portaient une selle fixe. Les articulations sont réalisées avec des axes et chapes ou des grains d'appuis. Dans le premier cas, on constate souvent des grippages et donc une modification du schéma mécanique avec une apparition de flexion dans le pylône. Cette flexion ajoutée à la compression simple (seule prise en compte dans le dimensionnement initial) peut conduire à des contraintes exagérément élevées dans les pylônes. L'articulation sur grain d'appui peut rester efficace si elle n'est pas colmatée par des corps étrangers.

7.2.2 - Le béton armé

Le béton armé par sa capacité en compression a été et reste communément choisi pour réaliser les pylônes. Il peut être utilisé pour les trois types de pylônes. En cas d'articulation de pied, on utilise une section rétrécie de béton (ou articulation Freyssinet) et quand les pylônes sont de grande hauteur, on peut utiliser leur souplesse pour autoriser les déplacements nécessaires des appuis du câble.

8 - Tabliers

Ce chapitre traite d'un élément structurel que l'on retrouve sur tous les ouvrages de franchissement, mais qui participe différemment au fonctionnement global de la structure dans le cas d'un pont suspendu.

Dans les ponts classiques, le tablier assure par son platelage une continuité de la voie portée mais a aussi le rôle structurel de ramener les charges sur ses appuis en mobilisant sa capacité de flexion.

Dans le cas d'un pont suspendu, la fonction porteuse est très majoritairement assurée par la suspension. Le tablier assure la continuité de la voie portée, répartit et transmet localement les charges aux suspentes et enfin, rigidifie la structure afin de lui permettre de résister au vent.

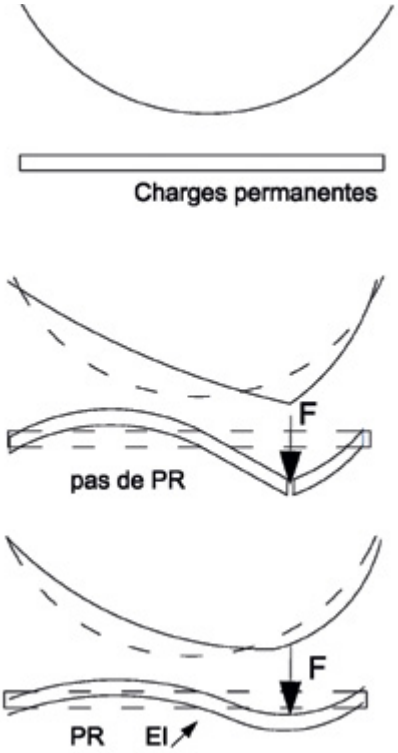
Ce changement significatif du rôle structurel du tablier a des conséquences importantes sur sa structure et sa conception.

Dans les ponts suspendus courants de moyenne portée, le tablier est constitué :

- de poutres de rigidité latérales ;
- de pièces de pont transversales ;
- de longerons ;
- d'un platelage.

Lors de la construction des ouvrages très anciens, l'intérêt des poutres de rigidité n'est pas apparu immédiatement. Les suspentes étaient très rapprochées et les charges mobiles étaient relativement faibles par rapport à la charge permanente. Les déplacements verticaux restaient alors relativement limités malgré la faible rigidité de flexion du tablier. Il convient de signaler que dans ce type d'ouvrage, la faible résistance du tablier en flexion peut entraîner des conséquences dramatiques en cas de rupture de suspente.

Rôle des poutres de rigidité



Sous charges permanentes, la poutre de rigidité n'est pas fléchie (à l'exception de flexion locale entre deux suspentes). Les charges permanentes sont reprises par la suspension.

Lors du passage des charges mobiles, la poutre de rigidité répartit les charges sur une plus grande longueur de câble, ce qui limite les déplacements verticaux de l'ouvrage.

Les poutres de rigidité, en augmentant la rigidité de flexion verticale et horizontale ainsi que la rigidité de torsion, augmentent la capacité de résister au vent.

Les poutres de rigidité ont usuellement des élancements de l'ordre de 1/50 pour 100 m, 1/100 pour 300 m, 1/100 à 1/200 au-dessus. Dans le cas de caissons, la hauteur retenue est le plus souvent entre 3 et 5 m et dépend peu de la portée. (Ces élancements sont à comparer à ceux des poutres fléchies qui varient usuellement entre 1/15 et 1/30).

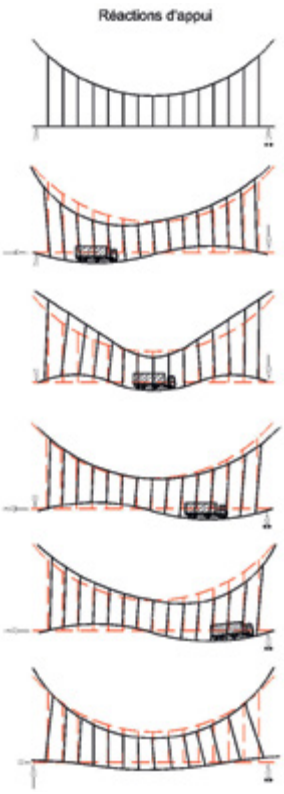
Figure 82 : Principe de fonctionnement d'une poutre de rigidité

Là aussi de très nombreuses dispositions ont été utilisées, elles dépendent de la date de réalisation de l'ouvrage et de la portée.

Le lecteur intéressé trouvera des informations plus détaillées sur les tabliers dans l'annexe 6 de ce guide.

9 - Appareils d'appui

Dans le cas des ponts suspendus, les appareils d'appui ont un fonctionnement un peu particulier dans la mesure où ils sont peu chargés verticalement et où la réaction verticale peut changer de signe.



Quand une charge se déplace sur le tablier la réaction d'appui peut changer de signe (le câble s'enfonce au droit de la charge, la tension et la longueur varient peu, il s'élève donc dans certaines sections et soulève le tablier). Les appareils d'appuis doivent donc supporter des réactions verticales des deux signes (ce qui est exceptionnel sur un pont).

Certains cas de charge, qu'ils soient pondéraux ou thermiques, entraînent un déplacement longitudinal du tablier et donc une inclinaison des suspentes. La composante horizontale de la traction du câble porteur n'est plus constante et une réaction horizontale apparaît sur les appuis fixes du tablier.

Le tablier d'un pont suspendu reste souple surtout dans le cas des ouvrages légers. Le passage des véhicules sur les points durs que constituent les appareils d'appui s'accompagne d'un effet dynamique intense.

Les structures suspendues sont souples, les appareils d'appui doivent donc permettre des rotations importantes dans le plan vertical (charges d'exploitation) et horizontal (charges de vent).

Figure 83 : Déplacement au passage d'une charge

Les appareils d'appui doivent assurer les fonctions suivantes :

- reprendre des actions verticales des deux signes ;
- reprendre des actions horizontales transversales (butée au vent) ;
- assurer un point fixe longitudinal par tablier (dilatation, freinage) ;
- assurer les degrés de liberté nécessaires au bon fonctionnement des tabliers (rotation dans les plans horizontaux et verticaux, variations géométriques dues aux effets thermiques).

Les appareils d'appui peuvent ainsi initier (s'ils sont dégradés ou mal conçus) mais aussi révéler des désordres structurels qui modifient leur fonctionnement et provoquent une dégradation accélérée voire des ruptures.

Le lecteur à la recherche d'informations plus détaillées sur les appareils d'appui pourra consulter l'annexe 7 de ce guide.

Figure 84 : Bielle d'appui

Figure 85 : Butée au vent

10 - Protection anticorrosion des suspensions

La protection anticorrosion des suspensions constitue un problème délicat pour le gestionnaire d'ouvrage. Ce chapitre donne des informations synthétiques sur le sujet.

Le lecteur intéressé trouvera des informations plus détaillées dans l'annexe 8 de ce guide.

10.1 - Éléments généraux

Historiquement, les câbles étaient protégés de la corrosion par des systèmes de peinture composés de produits noirs. Cette protection, basée sur un « effet barrière » assurée par une épaisseur sèche du revêtement élevée (> 300 µm), était choisie de façon plus ou moins empirique.

À la fabrication, les fils individuels d'acier étaient trempés dans un bain de produit noir, puis une couche de ce même produit était appliquée sur chaque couche du câble puis sur l'extérieur du câble terminé.

L'entretien consistait le plus souvent à refaire la protection extérieure à l'aide de produits noirs sous diverses formes après un nettoyage sommaire.

Dans les années 60-70, des produits à base de brai de houille ont été employés. La flexibilité du brai était alors particulièrement intéressante, mais par température élevée le produit pouvait fluer. Par la suite, ces produits ont été améliorés par l'incorporation d'une résine époxydique puis vinylique. Aujourd'hui, pour des raisons de toxicité des produits utilisés (plomb, amiante, brai de houille, etc.), on utilise régulièrement des systèmes bitumineux à haute viscosité.

Pour tous les ouvrages récents, les fils constitutifs des câbles sont galvanisés individuellement avant mise en peinture.

Il est impératif dans tous les cas de laisser la possibilité à l'eau de sortir du câble.

Les avis sont unanimes depuis les années 1980 : les fils doivent être galvanisés et peints (ou le câble en fils galvanisés déshumidifié).

La protection du câble galvanisé par une gaine en polyéthylène haute densité (PEHD) impose un culottage à la résine et pour les câbles porteurs pose des difficultés d'attache des suspentes.

Le produit de protection doit posséder un certain nombre de qualités :

- une certaine souplesse afin que le produit puisse suivre les différentes déformations du câble : flexion, torsion, allongement, etc., sans se fissurer ;
- une très bonne adhérence sur l'acier constitutif des câbles ou la galvanisation ou dans le cas d'entretien sans mise à nu de l'acier, une bonne compatibilité avec la protection existante, ce qui implique très souvent l'emploi d'un produit noir ;
- une bonne tenue dans le temps.

À côté de ces qualités spécifiques demandées au matériau lui-même, il faut ajouter un deuxième groupe de propriétés liées à la structure des câbles :

- une facilité d'application du produit et des exigences faibles sur la préparation du support en vue de l'application. En effet, les difficultés d'accès, la hauteur et la structure d'un câble ou d'un faisceau de câbles font que le décapage par projection d'abrasif ou le nettoyage sont difficiles à effectuer et que l'évacuation de la totalité des produits de décapage est pratiquement impossible ;
- la possibilité d'appliquer le produit de protection à la brosse ; une application au pistolet conduirait à trop de pertes ainsi qu'à une mauvaise protection de la périphérie et de certaines zones des câbles.

Points singuliers au droit des selles et colliers

L'endommagement intervenant prioritairement dans les points singuliers, la qualité de leur traitement anticorrosion est fondamentale.

D'une manière générale, il convient d'empêcher l'eau de pénétrer et de ne pas l'empêcher de sortir.

La conception de la protection anticorrosion sous les colliers doit répondre à des critères antagonistes : la protection contre la corrosion elle-même, le phasage des mises en peinture et le coefficient de frottement entre le câble et le collier.

Il est difficile d'avoir de nombreuses petites phases de peinture au moment du montage de la suspension. Par contre, l'intérieur des colliers peut être peint, par exemple avec un primaire riche en zinc et du zinc peut être apporté au montage sous forme d'une feuille ou de cales en zinc disposées entre le collier et le câble.

Le traitement des points singuliers nécessite en outre le plus souvent l'utilisation de mastic, un matériau dont la durée de vie est inférieure à celle des peintures.

Pour la pose de ce mastic, deux options sont possibles :

- le mastic est posé avant la couche de finition ;
- le mastic est mis en place après la couche de finition.

Il est à noter que dans la première option, la dernière couche va protéger le mastic des UV en créant un film continu.

10.2 - Évolution de la réglementation et des techniques

Évolution de la réglementation des systèmes anticorrosion

Les maîtres d'ouvrage se doivent d'organiser leurs travaux dans le respect de trois Codes :

- le Code de l'environnement, qui précise les obligations du maître d'ouvrage (article L-541-2) et les obligations d'ordre public (protection milieux aquatiques, faune, flore, espèces, etc.) ;
- le Code du travail, qui décrit les lois, décrets et règlements qui régissent les relations de travail ;
- le Code de la santé, qui précise le droit fondamental à la protection de la santé.

L'ancienne version du fascicule 56 du CCTG (1986) traitait de la protection des câbles, mais ce n'est plus le cas dans la nouvelle version de 2004. La technologie correspondante n'a pas été jugée suffisamment stabilisée et il est difficile de traiter la protection des câbles de manière standard.

L'ACQPA, organisme qui qualifie et certifie les produits, les opérateurs et les inspecteurs en peinture anticorrosion, a également exclu le cas des câbles.

Les exigences opposables aux systèmes de protection anti-corrosion doivent donc être entièrement décrites dans le CCTP des marchés de travaux. Pour cela, il convient de s'inspirer de la démarche générale utilisée dans l'ancien et le nouveau fascicule 56.

L'introduction d'amiante dans les peintures a été interdite en France en 1997.

Évolution des techniques

Il est apparu récemment de nouvelles techniques :

- le décapage à l'eau ultra haute pression (UHP), méthode à comparer à l'utilisation d'un abrasif ;
- la déshumidification des câbles.

On trouvera ci-dessous des informations relatives à la technique de déshumidification des câbles.

10.3 - Déshumidification des câbles

La déshumidification est une technique anticorrosion qui concerne surtout les ponts de grande taille. Son coût rapporté au coût global de construction est en effet plus faible que pour les petits ouvrages et sa maintenance et son suivi plus faciles.

Elle ne s'applique qu'aux câbles en faisceaux de torons élémentaires ou aux câbles à fils parallèles.

Cette partie ne donne que des informations synthétiques sur ce sujet. Le lecteur à la recherche d'informations plus détaillées devra consulter l'annexe 9 de ce guide.

La corrosion, c'est-à-dire la formation de rouille, dans les câbles métalliques ne se produit qu'en présence d'oxygène et d'eau. Il existe d'ailleurs un lien direct entre le taux d'humidité présent dans l'air et la propagation de la corrosion.

L'humidité relative HR a une influence importante sur la vitesse de corrosion :

- si HR < 40 % => la corrosion est nulle ;
- si 40 % < HR < 60 % => la corrosion est très faible ;
- si HR > 60 % => la corrosion devient importante.

Le principe d'un déshumidificateur est de maintenir le taux d'humidité relative à un niveau suffisamment faible pour que la vitesse de corrosion reste très faible.

La déshumidification est initialement apparue sur les grands caissons métalliques où elle a été envisagée comme une réponse aux difficultés de remise en peinture de l'intérieur des caissons.

La déshumidification des câbles nécessite les composants suivants :

- des déshumidificateurs ;
- un gainage des câbles (qui constitue le conduit dans lequel circule l'air sec) ;
- des points d'injection et d'extraction de l'air sec ;
- une série de capteurs répartis sur le câble, utilisés en contrôle et éventuellement en asservissement du système.

Figure 86 : Déshumidificateur

Chapitre **3**

Notions sur la nature des défauts et des désordres

Les ponts suspendus sont des ouvrages qui présentent des pathologies spécifiques liées à un fonctionnement particulier (grands déplacements), à un matériau spécifique (le câble) et à de nombreuses dispositions technologiques souvent plus proches de la mécanique que du génie civil.

Les défauts et désordres les plus courants sont décrits par parties d'ouvrage.

1 - Piles, culées et massifs d'ancrage

On se reportera utilement au fascicule 10 de l'ITSEOA.

Les massifs d'ancrage subissent un chargement particulier appliqué par les câbles. La force qui y est appliquée présente une composante verticale ascendante et une forte composante horizontale.

Une surcharge des câbles ou un déjaugeage des massifs peut conduire à un déplacement horizontal. Ce type de phénomène, très dangereux pour la structure, ne semble toutefois pas avoir été constaté jusqu'à présent.

2 - Pylônes

On trouve sur les pylônes les problèmes relatifs à leur matériau constitutif (maçonnerie, acier ou béton armé).

Les problèmes structurels rencontrés sont liés à un blocage des déplacements (articulation de pied à axe ou articulation Freyssinet) ou blocage de rouleaux d'appui de selles. Dans ce cas, les déplacements d'appui des câbles imposent un chargement de déformation au pylône. La réponse du pylône dépend de sa souplesse et de l'amplitude de déplacement. Des fissures ou fractures peuvent apparaître en cas de dépassement des capacités du pylône en flexion ou effort tranchant.

Les fûts de pylônes sont souvent reliés par une entretoise transversale qui augmente la résistance d'ensemble au vent (charges horizontales transversales ramenées par les selles en tête de pylône) et rigidifient les fûts les plus élancés afin de leur éviter de flamber. Des chargements opposés sur les deux rives de tablier conduisant à des mouvements antagonistes de fûts, ce comportement peut conduire à des désordres s'il n'a pas été pris en compte ou s'il a été sous-évalué.

3 - Suspensions

3.1 - Câbles

Le câble est un « matériau » soumis à des phénomènes d'endommagement spécifiques qui sont listés dans ce chapitre.

Le lecteur intéressé trouvera des informations plus détaillées sur les mécanismes mis en jeu et les effets de ces endommagements dans l'annexe 10 du présent guide.

3.1.1 - Défauts possibles sur le fil tréfilé

Les déformations plastiques provoquées par le tréfilage sont hétérogènes du centre à la périphérie. Si les contraintes de cisaillement ainsi générées sont trop intenses, il peut apparaître des décohésions pouvant induire des ruptures :

- pendant le tréfilage (casses) ;
- lors de la mise en tension du câble ;
- après des cycles de chargement (fatigue).

Le refroidissement rapide des fils peut provoquer une fissuration radiale du fil incompatible avec sa mise en forme.

Les déformations plastiques imposées par le tréfilage engendrent, après retour élastique, des contraintes résiduelles : traction en surface (sur une épaisseur généralement inférieure au millimètre) et compression à cœur.

Ces défauts inhérents à la fabrication des fils peuvent permettre l'amorçage de mécanismes de dégradation décrits plus loin.

3.1.2 - Fils galvanisés ou fils « clairs »

Les fils n'ont été galvanisés que tardivement en France. Le cours de M. Grelot de 1956 déconseillait la galvanisation des fils.

Dans les câbles modernes (à partir du début des années 80 environ en France, mais il existe des exceptions), les fils sont galvanisés. Les fils sont alors revêtus de zinc ou d'alliage zinc / aluminium par immersion dans un bain de métal fondu. Dans le cas de fils ronds, la galvanisation peut être effectuée à la fin des opérations de tréfilage (« fils galvanisé en terminal ») ou entre deux opérations de tréfilage (« fil galvanisé retréfilé »).

Les fils galvanisés sont des fils revêtus de zinc à la fabrication. On appelle communément « fils clairs » les fils non revêtus qui sont alors de couleur noire.

3.1.3 - Géométrie des fils

La majorité des fils est de section circulaire mais des fils de section différente peuvent être employés dans les couches extérieures afin d'améliorer l'étanchéité et/ou avoir une surface extérieure lisse. Ces fils de section rectangulaire, trapézoïdale ou en Z, sont mis en forme par des galets après un tréfilage préliminaire.

3.1.4 - Constitution des torons élémentaires à partir des fils

L'assemblage de ces fils pour constituer un câble élémentaire est le plus souvent obtenu par toronnage : enroulement autour d'un noyau de fils jointifs sous forme d'hélice. Le noyau élémentaire est un (ou plusieurs) fil cylindrique rectiligne autour duquel sont enroulés cinq ou six fils. Les couches de fils successives sont ensuite enroulées avec des pas inversés les unes à la suite des autres, chaque couche comportant six fils de plus que la précédente.

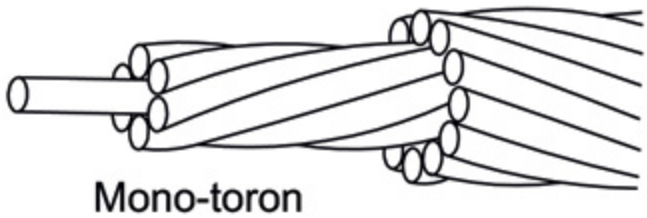


Figure 87 : Constitution d'un toron élémentaire

3.1.5 - Mécanismes de dégradation des câbles métalliques

Ce chapitre donne des informations synthétiques sur le sujet.

Le lecteur intéressé trouvera des informations plus détaillées dans l'annexe 10 de ce guide.

Les mécanismes de corrosion et de dégradation sont des phénomènes complexes qui, de manière synthétique et exagérément simplifiée, peuvent se décomposer de la manière suivante.

3.1.5.1 - Corrosion généralisée

Le phénomène de corrosion est un processus naturel qui conduit la plupart des matériaux métalliques placés dans un environnement naturel à retourner vers leur état original : l'état oxydé (composé avec l'oxygène, le soufre, etc.).

3.1.5.2 - Corrosion par piqûres et crevasses

La formation de piqûres est une forme de corrosion localisée qui repose sur l'existence de petites zones anodiques associées à une grande zone cathodique. Ces zones anodiques proviennent d'hétérogénéités à la surface du métal, de perte locale de passivation (ex. : début de la destruction du revêtement de peinture). Une forme proche est la corrosion caverneuse où les mêmes mécanismes sont mis en jeu dans des zones confinées avec un milieu stagnant (zones sous dépôts de corrosion, sous mastics mal adhérents au niveau de culots bas, etc.).

3.1.5.3 - Formation de couples galvaniques (effet de pile)

La corrosion galvanique est la création d'une pile électrochimique entre deux zones (anodique et cathodique) du métal. Ces deux zones peuvent être dues à une différence de potentiels électrochimiques entre deux matériaux dans le même électrolyte ou à l'existence de deux milieux différents en contact avec le même matériau. Ce processus n'a pas été observé (peu) pour les câbles anciens composés de fils « clairs ». Par contre, l'utilisation de revêtements de zinc (galvanisation) au contact des aciers nus (les aciers des colliers ou des ancrages) peut conduire à une corrosion de l'acier.

3.1.5.4 - Corrosion fissurante sous contrainte

Ce mécanisme de dégradation est propre aux aciers à haute résistance, famille dont font partie les aciers utilisés pour la fabrication des fils. En effet, l'état métallurgique des aciers qui permet d'obtenir des limites d'élasticité et des contraintes à la rupture élevées, s'accompagne d'une sensibilité réelle au phénomène de fissuration par corrosion en présence de contraintes dépassant un seuil voisin de 40 à 50 % de la contrainte de rupture.

Les manifestations de la présence d'une fissure sur les caractéristiques mécaniques d'un fil sont la perte de charge à la rupture et la perte d'allongement à la rupture alors que le module global apparent reste celui d'un fil sain.

La rupture intervient lorsque le seuil de propagation brutale de la fissure est atteint. Aucune autre modification de la courbe effort/déformation de l'essai de traction n'apparaît.

Les fissures de fatigue ont les mêmes conséquences.

3.1.5.5 - Mécanismes de rupture par fatigue

Les câbles de suspension sont soumis à des chargements et à des déformations en flexion variables en fonction du trafic, de la température, de l'ensoleillement, du vent et de la pluie. Les fils unitaires sont donc soumis à des variations de contrainte aléatoires (sollicitations dynamiques) dont les conséquences sont celles des chargements en fatigue.

3.1.5.6 - Mécanismes de frottement en petits débattements

Fretting wear / fretting fatigue

Figure 88 : Schéma des déformations subies par un pont à trois travées suspendues au passage d'une charge

Il existe de nombreux contacts intermétalliques dans et sur les câbles pour ouvrages d'art :

- contacts inter filaires dans un même toron ;
- contacts inter filaires entre torons jointifs ;
- contacts entre fils externes et éléments d'appui (selles, déviateurs), éléments de liaison (colliers) et pièces d'ancrage (cônes trompette, clavette).

Le fait d'assembler les fils par toronnage à pas inversés crée, au niveau des contacts entre fils constitutifs des câbles tendus, des contraintes locales supplémentaires. Celles-ci modifient la contrainte moyenne de sollicitation en fatigue et l'étendue des variations de contrainte conduisant à la rupture pour un nombre de cycle déterminé.

Le comportement en fatigue apparent d'un câble est dégradé par rapport à celui d'un fil unique rectiligne.

Cet effet de câblage est très dépendant du pas de toronnage et du nombre de couches. Par contre, en théorie, un câble multi-fils parallèles présente la même tenue à la fatigue qu'un fil unique.

3.1.5.7 - Influence favorable du zinc

L'utilisation de fils galvanisés à la place de fils clairs augmente la durée de vie et l'endurance des câbles. En effet, le zinc est favorable vis-à-vis de la corrosion et retarde l'apparition des fissures de fretting/fatigue.

3.1.5.8 - Combinaison de processus de dégradation

Assez souvent, plusieurs processus interviennent conjointement ou successivement. On note, en particulier, que les phénomènes de corrosion généralisée ou par piqûres ou même par formation de crevasses sont souvent associés au processus de fissuration par corrosion sous contrainte ou par fatigue.

De nombreux auteurs observent une diminution des durées de vie en fatigue et la diminution de la limite d'endurance lorsque les phénomènes de fatigue se développent dans un milieu corrosif (eau/eau de mer, etc.).

3.2 - Culots d'ancrage

Jusqu'à présent, les ruptures de câbles élémentaires se sont produites au niveau des culots d'ancrages inférieurs.

Ainsi un toron s'est rompu dans un culot d'ancrage du pont du Teil en septembre 2007. Les analyses conduites après cette rupture ont conduit à changer la suspension de l'ouvrage.

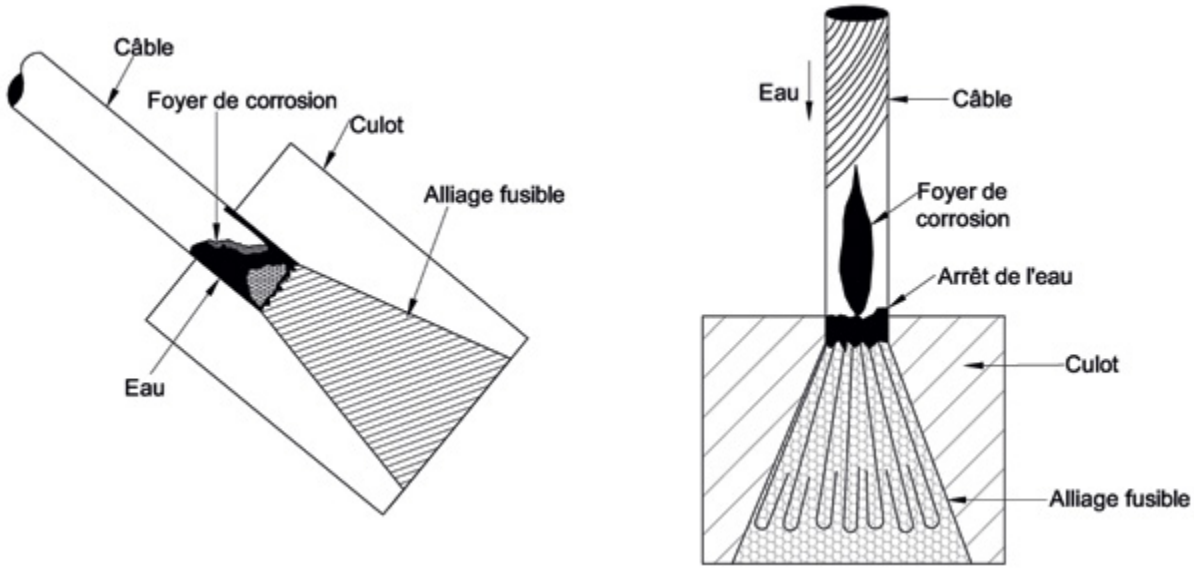


Figure 89 : Débuts du phénomène de rétention et de corrosion sur les culots bas

Dans les culots exposés aux intempéries, on rencontre deux types de pathologies liées à la corrosion.

Dans les culots supérieurs (attaches supérieures de suspentes ou des câbles discontinus sur pylônes), l'eau percole à travers le culot et corrode le câble par l'intérieur.

Dans les culots inférieurs (ancrages des câbles porteurs et attaches basses de suspentes), l'eau qui migre sur le câble et à l'intérieur de celui-ci va se stocker dans des zones de rétention si elles existent.

Il convient donc d'éviter ces possibilités de rétention avec des masticages ou, plus efficacement, en s'assurant que le métal fondu sorte du culot afin de garantir l'absence de zones de rétention possibles.

Les culots d'ancrage peuvent aussi être l'objet des désordres suivants :

- on peut trouver des fissures dans les culots d'ancrage moulés si le matériau utilisé est fragile ;
- le cône de matériau fusible peut avancer de quelques millimètres dans la douille lors du chargement du câble. Si le matériau fusible a été utilisé à une température trop faible ou si la douille n'a pas été chauffée, le cône peut être incomplet. Ce phénomène a deux conséquences :
  - les câbles avancent de manière hétérogène dans les douilles lors du premier chargement du câble, ce qui induit des différences d'effort de traction dans les différents torons élémentaires,
  - les vides ainsi créés piègent l'eau cheminant dans le câble ce qui augmente le risque de rupture de fils ou de torons dans le culot ;
- on peut constater des défauts d'alignement des barres d'ancrage, des douilles et du câble. Ces défauts géométriques provoquent des contraintes parasites de flexion pouvant provoquer l'apparition de fissures de fatigue.

3.3 - Selles, sellettes et colliers d'épanouissement

On trouve régulièrement des défauts géométriques dans le dessin de ces pièces. Parfois, le câble en sortie s'appuie sur une arête vive au lieu d'être tangent à la surface d'appui, disposition qui est très agressive pour le câble.

Même avec un dessin correct, les variations de charge créent des variations angulaires et des micro déplacements dans les zones limites de contact. Ces phénomènes générateurs de « fretting » peuvent conduire à des ruptures de fils.

Ces pièces (surtout celles en matériaux moulés) peuvent être constituées de matériaux fragiles et être l'objet de fissures.

Ces pièces ont souvent été prévues mobiles afin de permettre les déplacements des points d'appui des câbles. Cette fonction était classiquement assurée par déplacement sur une série de rouleaux. Quand ceux-ci sont grippés, lors de cas de charge imposant normalement des déplacements des appuis de câbles, le chargement de déplacement est imposé au support. Si l'amplitude du déplacement et la souplesse du support sont compatibles, l'effet est négligeable ; dans le cas contraire, on constate des désordres ou des ruptures sur le support.

3.4 - Suspentes

On retrouve sur les suspentes les problèmes relatifs aux matériaux employés (câbles ou barres éventuellement fragiles).

Le glissement de l'attache supérieure sur les câbles inclinés est fréquent sur les ponts anciens. Il provoque un déréglage de la suspension et une mise en butée éventuelle de l'attache inférieure de la suspente.

Le fonctionnement normal d'un pont suspendu implique des déplacements relatifs longitudinaux des câbles porteurs et du tablier, particulièrement importants dans le cas de travées multiples. Les charges transversales et effets parasites induisent également des déplacements transversaux, toutefois beaucoup plus faibles. Ces déplacements imposent des rotations au niveau des attaches mais celles-ci n'ont pas toujours été prévues ou sont devenues impossibles du fait de la corrosion. Dans ce cas, les déplacements créent des flexions parasites dans les éléments concernés, flexions d'autant plus intenses que les déplacements sont importants (travées multiples) et que les suspentes sont courtes et rigides (barres). Dans le cas des barres filetées, ces flexions alternées peuvent conduire à des ruptures par fatigue.

4 - Tabliers

Les tabliers des ponts suspendus sont réalisés en structure métallique (du bois a été utilisé pour les plus anciens). Le lecteur pourra se référer au fascicule 33 de l'ITSEOA « Ponts métalliques » pour recueillir les informations spécifiques à ce type de tablier.

La spécificité des ponts suspendus réside dans le comportement particulier des poutres de rigidité. En effet, en première approche, on peut considérer que la poutre de rigidité subit un chargement de déformations imposé par le déplacement du câble porteur.

Ainsi, dans le cas d'un déréglage important de l'ouvrage ou au passage d'une charge trop élevée, la poutre de rigidité peut déverser ou se retrouver fortement endommagée.

Le flambement (ou l'amorce de flambement) de la membrure supérieure dans le cas de poutres de rigidité latérales est alors dû à un effort normal trop important dans la membrure supérieure associé à un maintien transversal insuffisant.

Figure 90 : Flambement de la membrure supérieure d'une poutre de rigidité

5 - Appareils d'appui

Les désordres sur les appareils d'appui sont dus à diverses causes dont les principales sont les suivantes :

- la dégradation des appareils d'appui peut traduire des problèmes globaux de fonctionnement de la structure ; par exemple un déréglage de la suspension peut augmenter significativement la charge statique des appareils d'appuis ;
- le schéma mécanique d'ensemble n'est pas cohérent soit depuis la conception initiale, soit à la suite de modifications hasardeuses) ;
- la charge permanente a augmenté suite à un déréglage de la suspension ou de modifications des superstructures ;
- les charges sont plus importantes que prévu : elles ont été sous-évaluées dès l'origine, les charges permanentes ou d'exploitation ont augmenté, l'ouvrage est déréglé ou les effets dynamiques sont plus intenses que prévu ;
- le fonctionnement normal a provoqué des usures qui ont induit des battements qui ont augmenté les effets dynamiques ce qui crée une usure et des charges dynamiques évoluant de manière « exponentielle ».

Ces désordres peuvent se traduire de la manière suivante :

- détérioration des attaches sur le génie civil ;
- détérioration de l'appareil d'appui lui-même (déformations, jeux, soudures fissurées) ;
- détérioration de la fixation sur le tablier (déconsolidation d'assemblages boulonnés, fissurations de soudures, déformations).

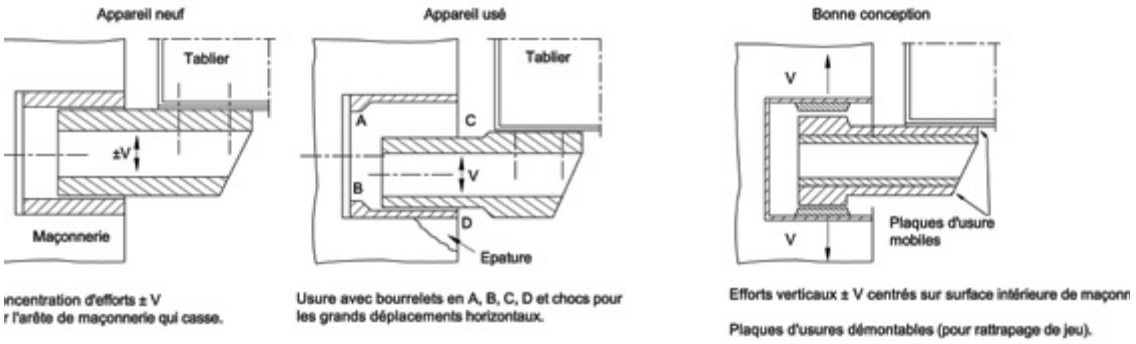


Figure 91 : Principe de l'usure des appareils d'appui présentant des surfaces de frottement planes

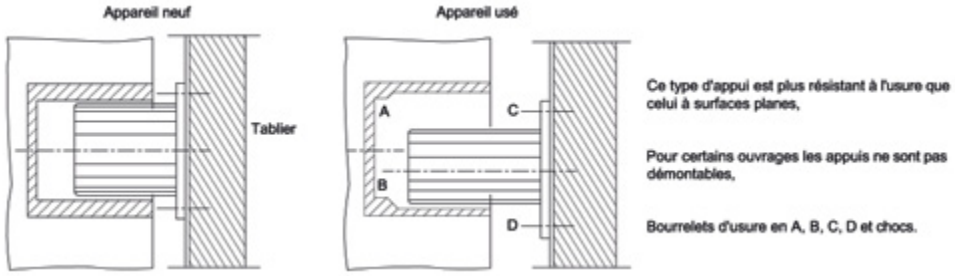


Figure 92 : Principe de l'usure des appareils d'appui présentant des surfaces de frottement cylindriques

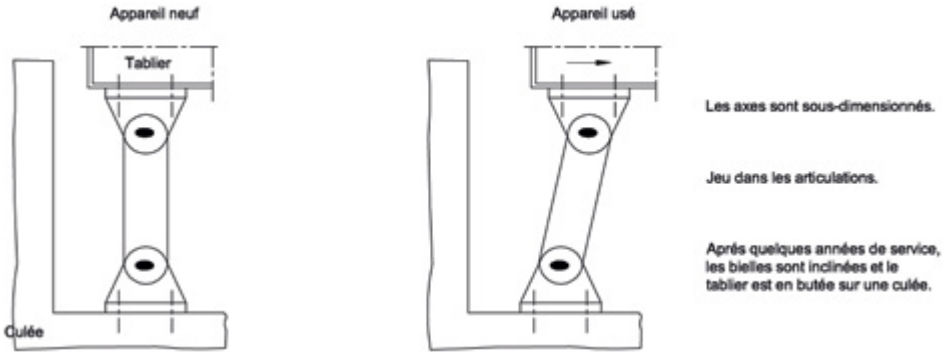


Figure 93 : Principe de l'usure des bielles : apparition d'une inclinaison et d'une modification progressive du fonctionnement par introduction d'un effort horizontal provoquant une mise en butée du tablier

6 - Protection anticorrosion des suspensions

De par leur géométrie et leur fonctionnement, les câbles sont des zones particulièrement difficiles à protéger. Une de leurs particularités est leur sensibilité intrinsèque à la corrosion, notamment due au fait que leur structure permet les cheminements d'eau internes.

La valeur anticorrosion des produits noirs utilisés autrefois était très variable d'un produit à un autre. Leur inconvénient majeur est qu'ils cachent très souvent des développements de rouille sous un revêtement d'apparence saine.

Ces revêtements étaient très sensibles à la chaleur en été.

6.1 - Origine des défauts et des désordres des protections anticorrosion

Les systèmes anticorrosion sont soumis aux agressions suivantes :

- UV ;
- cycles humidité/sécheresse ;
- érosion sous les effets du vent.

Dans le cas des câbles, il convient d'ajouter à ces agressions classiques les sollicitations mécaniques dues aux déplacements et déformations du support du complexe anticorrosion.

Les effets de ces agressions sont parfois augmentés des conséquences des défauts de préparation de surface et d'application liés à la géométrie complexe du support :

- défaut d'adhérence ;
- écaillage et fissuration (amplifiée par les mouvements inter filaires) ;
- cloquage gonflement (le film devenu poreux a permis le développement d'une corrosion sous-jacente ;
- farinage : les produits au bitume utilisés pour leur souplesse sont plus sensibles aux UV qui les dégradent lentement en produisant une poudre blanchâtre ;
- durée de vie des mastics souvent inférieure à celle des peintures, même dans le cas plus favorable d'une mise en œuvre sous la dernière couche de peinture.

6.2 - Zones préférentielles de corrosion

La protection anticorrosion n'évolue pas de façon homogène sur l'ensemble des câbles. Il existe des zones préférentielles de corrosion se situant au niveau des zones où l'eau va stagner :

- le bas des câbles de retenue, près des culots, particulièrement dans les chambres d'ancrages humides ;
- l'intérieur des colliers d'épanouissement, dans le cas de disposition géométrique des câbles en faisceau ou en couronne ;
- l'intérieur des colliers sur câbles, au droit de l'attache haute des suspentes ;
- la partie basse de la parabole ;
- le bas des suspentes en câble, près des culots ;
- le bas des haubans, près des culots ;
- accessoirement, la protection anticorrosion à l'intérieur des faisceaux lorsque l'évacuation de l'eau en partie basse n'est pas correctement assurée.

7 - Rupture fragile des aciers

Des cas de rupture de constructions en acier ont été signalés le plus souvent sur des structures soudées et par temps relativement froid. Ainsi 30 % des liberty ships, les bateaux construits par les États-Unis pendant la seconde guerre mondiale pour préparer le débarquement de 1944, ont eu des problèmes de ce type. En 1967, le pont suspendu de Point Pleasant aux États-Unis s'est effondré à cause d'une rupture en chaîne des barres d'acier constituant ses suspentes. Plus récemment, le 16 janvier 1985, le pont de Sully-sur-Loire, un pont suspendu à travées multiples et câbles de tête, s'est effondré brutalement par une température de -23 degrés. L'effondrement a été initié par des ruptures fragiles d'aciers en barres dans des zones filetées. Cet accident a donné lieu à de nombreuses investigations et a conduit à la mise au point d'une méthodologie de gestion par temps froid du parc de ponts suspendus existants à cette époque. La méthodologie élaborée après cet accident s'appuie sur la mécanique de la rupture.

Le risque de rupture dépend de :

- la nature de l'acier ;
- la contrainte ;
- la température (le risque augmente avec le froid) ;
- la géométrie (géométrie extérieure mais aussi présence de défauts et épaisseur) ;
- le mode (vitesse) de chargement.

La gestion de ce risque est un problème prégnant pour la gestion de la sécurité des ponts suspendus.

Un gestionnaire de pont suspendu doit savoir s'il existe des aciers fragiles sur son ouvrage. Les mesures d'exploitation en présence d'aciers fragiles dépendent d'une analyse prenant en compte le niveau de fragilité des aciers concernés, le niveau de contrainte, l'agressivité des détails géométriques (les filetages en particulier), les redondances dans la structure et les *scénarii* de ruine possibles.

On trouvera dans l'annexe 11, un exposé plus détaillé de la rupture fragile et de la méthode de gestion d'un parc de ponts suspendus mise au point à la fin des années 80, après l'effondrement du pont de Sully-sur-Loire.

Il paraît intéressant de vérifier les points suivants :

- les prescriptions de gestion par temps froid sont-elles bien celles résultant de l'expertise et sont-elles bien appliquées ?
- l'échantillonnage pris en compte est-il suffisant ?
- la contrainte de 150 MPa prise en compte dans les barres filetées pour la méthode mise au point en 1987 (*cf.* annexe 11) est-elle valide pour l'ouvrage ? N'est-elle pas augmentée par des flexions parasites ?
- des phénomènes de fatigue (la fatigue n'était pas prise en compte dans les ouvrages d'art à cette époque) ne peuvent-ils pas faire évoluer une fissure jusqu'à la taille critique provoquant la rupture ?

Il paraît d'autant plus nécessaire de répondre à ces questions que l'on s'oriente vers des réhabilitations ou renforcements lourds visant à augmenter les charges sur l'ouvrage et/ou sa durée de vie résiduelle de manière significative.

Chapitre **4**

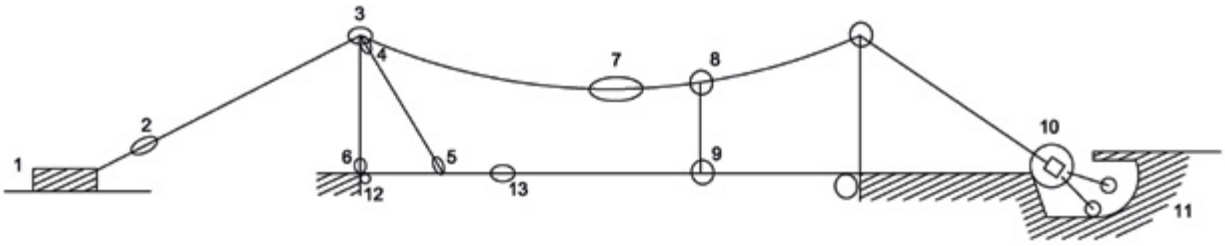
Surveillance

Les ponts suspendus présentent certaines spécificités vis-à-vis de la surveillance :

- les ouvrages s'adaptent aux charges par grands déplacements ;
- l'élément « câble » présente un comportement spécifique vis-à-vis des agressions extérieures et des sollicitations mécaniques ;
- les ponts suspendus comportent de nombreuses pièces dont la conception s'apparente plus à la mécanique qu'au génie civil.

1 - Spécificités de ces ouvrages : points à surveiller particulièrement

Les points suivants doivent faire l'objet d'une attention particulière dans le cadre des différentes actions de surveillance.



1. Massif d'ancrage
2. Ancrage des câbles de retenue
3. Selles d'appuis des câbles porteurs
4. Attaches supérieures des câbles haubans
5. Attaches inférieures des câbles haubans
6. Fûts des pylônes
7. Point bas des paraboles des câbles porteurs
8. Attaches hautes de suspentes
9. Attaches basses de suspentes
10. Épanouissement des câbles de retenue (point bas)
11. Ancrage des câbles élémentaires dans les chambres d'ancrage
12. Appuis et butées au vent
13. Poutre de rigidité

Figure 94 : Points à surveiller particulièrement

2 - Surveillance des câbles

La méthode de base de contrôle des câbles est le contrôle visuel. Cette méthode n'est pas spécifique en elle-même mais porte sur des points particuliers en fonction des mécanismes de désordres impliqués et des dispositions accessoires à mettre en œuvre pour l'accès aux câbles.

D'autres méthodes de contrôle ou surveillance peuvent être mises en œuvre. Leur bonne application, ainsi que l'obtention de données exploitables, demandent toutefois des équipements particuliers et des analyses préalables.

2.1 - Contrôles visuels

Ces contrôles sont effectués dans le cadre de l'Inspection détaillée.

Les contrôles visuels corrects s'effectuent en accédant au plus près des câbles et de leurs zones d'ancrage de déviation ou de liaison (colliers).

Ils demandent des moyens d'accès adaptés : nacelles, passerelles de visite, lignes de vie, des éléments de visualisation : éclairage, loupes, réflecteurs et des équipements de nettoyage simples (brosses, chiffons, spatules) Un bon appareil photographique, un réglet, etc. peuvent compléter utilement ces équipements.

La période d'inspection influe également sur la « visibilité » des défauts : une période pluvieuse ou humide mettra en évidence les « passages » des eaux mais masquera les fissures de la peinture.

Pour un contrôle plus « poussé », il sera nécessaire de déposer quelques éléments particuliers : tubes de transition, colliers, protection de haut de pylône, gaine, etc. et d'effectuer un nettoyage (grenaillage, démastiquage).

Ces examens pourront alors conduire à des réparations locales indispensables au remontage des éléments déposés : brasage, collage des fils rompus (le collage à la résine d'un fil rompu ne permet pas la restitution de la section du fil dans la section de rupture mais empêche le détoronnage), réfection de la protection.

2.2 - Oxydation

L'oxydation des fils de câbles et leur gonflement éventuel apparait après disparition du système de peinture (figure 95-1). Le sablage (figure 95-2) met bien en évidence la dissolution des fils et leur écartement lié au gonflement du cœur (oxydation des couches internes).

Photos 1 et 2 :
Suspente présentant une forte corrosion externe et un gonflement en partie courante, avant et après grenaillage. Fils dissous et disjoints sous l'effet du gonflement interne des couches oxydées

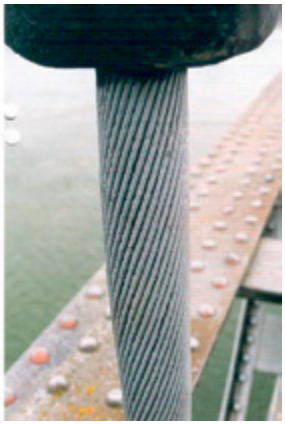


Figure 95

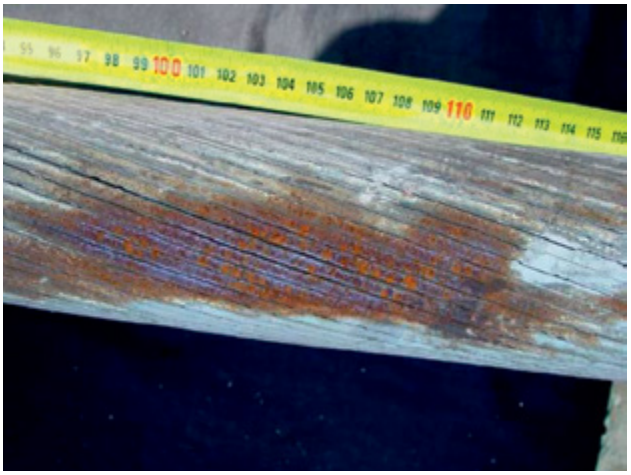


Figure 96 : Lorsque les câbles sont galvanisés, l'enrouillement est le signe de la disparition du zinc de protection (après écaillage de la peinture)

La photo ci-dessus montre un câble clos galvanisé dont le revêtement de peinture s'est écaillé. On constate la disparition de la couche de zinc et un début de corrosion généralisée. À ce stade, les couches galvanisées internes ne sont pas dégradées. Les couches internes de fils non galvanisés, enrobés de produit de remplissage, ne sont pas, non plus, atteintes par la corrosion (quand le produit a été appliqué de manière continue). Le câble possède encore sa capacité initiale mais le processus de dégradation est entamé.

2.3 - Identification de zones de stagnation d'eau

Figure 97 : Eaux stagnantes sur un ancrage bas et sur un ancrage haut de suspente

Figure 98 : Gouttelettes d'eau suintant au travers de la couche externe du toron : l'eau pénètre par l'arrière de la douille entre l'acier et le zinc du culot. Le métal de culottage s'est figé avant d'enrober entièrement tous les fils en contact avec la douille et laisse un espace libre autour de certains fils des couches internes qui ont été placées à l'extérieur du chignon

Figure 99 : Masticage défaillant à l'entrée d'un collier. Mastic entre torons supérieurs du faisceau formant des cuvettes. Au niveau des flèches : fissuration de la peinture marquant la rupture d'un fil sous le collier

2.4 - Détection de fils rompus

Sur la figure 99, l'observation permet de distinguer deux fissures de la peinture de part et d'autre d'un fil, ce qui est le signe de la rupture probable de ce fil sous le collier (ces fissures fines sont peu visibles lorsque la surface des câbles est humide).

En section courante, les ruptures de fils sont directement visibles mais moins probables : si le fil n'est pas profilé, il échappe le plus souvent au toron.

À proximité des selles ou des colliers, quand la peinture est sèche, les ruptures de fils qui restent maintenus se traduisent par une rupture du film de peinture.

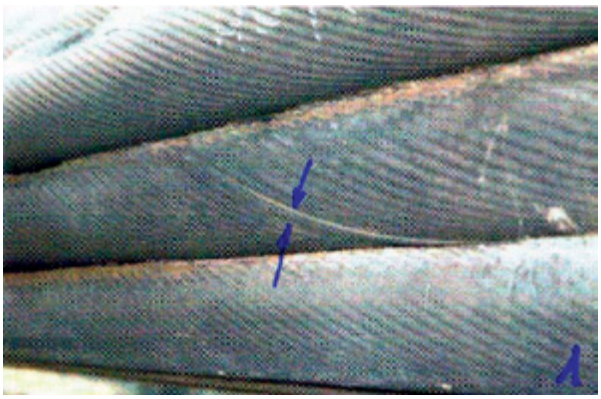
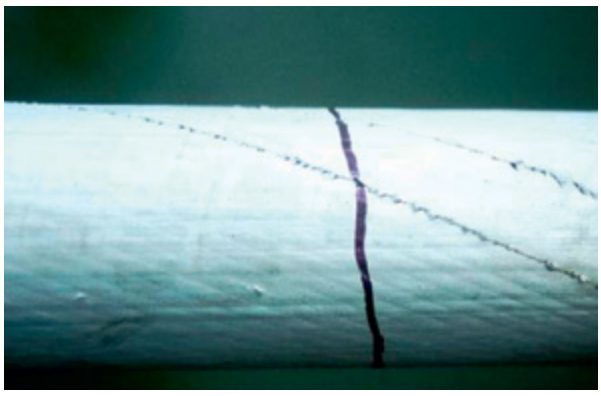


Figure 100 : Marque de glissement d'un fil rompu et corrosion généralisée entre torons voisins

Figure 101 : Rupture visible d'un fil entre deux torons



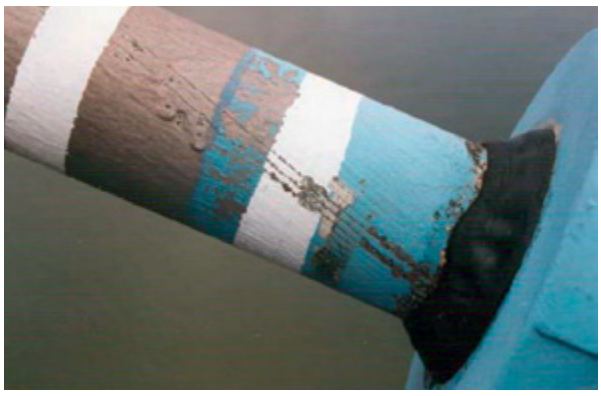


Figure 102 : Rupture de fils dans des culots.
Dans les deux cas, les ruptures peuvent être détectées par l'observation des films de peinture fissurés par le retrait des fils rompus avant ré ancrage

Figure 103 : Des ruptures de fils sous une selle provoquent l'application d'un moment de torsion sur le toron concerné. Les effets de ce moment de torsion sont facilement détectés par l'écartement des deux torons voisins

3 - Surveillance des massifs d'ancrage à tirants d'ancrages scellés dans le sol

Les tirants d'ancrage sont des éléments vitaux pour la structure et il convient donc de prendre certaines précautions vis-à-vis de leur conception, de leur contrôle et de leur possibilité de remplacement.

Ces éléments peuvent se détendre et sont potentiellement sensibles à la corrosion sous tension. Le maître d'ouvrage d'un pont de ce type doit donc procéder à une surveillance régulière des tirants pendant toute la vie de celui-ci. Conformément aux normes NF P94-153 et NF EN 1537 ainsi qu'aux recommandations TA 95, le maître d'ouvrage est tenu d'effectuer des contrôles annuels de tension :

- sur au minimum 10 % des tirants, si le nombre total N de tirants est compris entre 1 et 50 ;
- sur 7 % des tirants, si N est compris entre 51 et 100 tirants ;
- sur 5 % des tirants, si N est supérieur à 101 tirants.

Les têtes des tirants doivent donc être équipées pour permettre un contrôle de la traction subsistante par mise en tension.

La conception du système d'ancrage doit aussi permettre, en cas de constat de défaillance de tirants, de rajouter des tirants complémentaires aux endroits où ils sont nécessaires, afin de compenser les défaillances et maintenir ainsi la capacité globale du massif.

Ces raisons poussent certains concepteurs et maîtres d'ouvrage à préférer aux tirants l'utilisation de micropieux qui peuvent fonctionner de manière permanente en traction et sont beaucoup moins sensibles à la corrosion ou utiliser le poids comme dans les conceptions anciennes. Il est aussi possible de coupler ces techniques.

4 - Surveillance d'un système de déshumidification

Contrairement au système de peinture, la déshumidification impose une surveillance en continu.

La surveillance de la déshumidification peut se décomposer en trois points :

- le monitoring ;
- les déshumidificateurs ;
- les dispositifs sur le câble.

4.1 - Le monitoring

Il s'agit de vérifier les paramètres (humidité relative, pression, température) sur les sondes afin de contrôler que les objectifs d'assèchement de l'air autour du câble sont effectivement atteints.

Le contrôle de l'humidité relative vise à garantir une stabilisation de celle-ci au-dessous de 40 %. Sur le pont d'Aquitaine, il existe un objectif supplémentaire limitant l'humidité relative à 50 % sur 24 heures, le but de cette exigence étant de vérifier la réactivité du système afin de limiter les pics ponctuels d'humidité relative.

Le contrôle de la pression permet de vérifier qu'au point d'injection celle-ci ne soit pas trop forte au risque d'endommager la gaine ou l'étanchéité. Au point d'extraction, on s'assure que la pression est suffisante pour garantir l'évacuation de l'air humide et qu'une légère surpression empêche l'air extérieur de pénétrer par les défauts d'étanchéité.

Le contrôle de la température permet de vérifier que l'air au point d'injection n'échauffe pas trop la gaine (problème de sécurité pour la gaine, les usagers et les opérateurs).

L'analyse des données fournies par le monitoring permet aussi de détecter le dysfonctionnement d'une sonde.

Pour évaluer l'efficacité du système dans le temps, on compare aussi la quantité d'eau dans l'air aux points d'injection et de sortie. Pour cela, la quantité d'eau est calculée en prenant en compte la pression, l'humidité relative et la température. Au début de l'installation et pendant les premières années, l'air est plus humide au point d'extraction qu'au point d'injection, ce qui traduit la présence d'humidité. L'objectif à atteindre est d'avoir à terme une quantité d'eau dans l'air identique en injection et en extraction.

4.2 - Les déshumidificateurs

Le monitoring doit permettre de surveiller l'efficacité des déshumidificateurs (caractéristiques de l'air injecté dans la gaine du câble) et peut permettre de récupérer des alertes de défauts. Ces appareils fonctionnent presque en continu et nécessitent une surveillance et une maintenance très régulières. Des visites périodiques des déshumidificateurs par des spécialistes sont nécessaires.

4.3 - Les dispositifs sur le câble

Il s'agit de la gaine, des liaisons étanches aux entrées et sorties de colliers, des dispositifs étanches sur collier des points d'injection et d'extraction, du réseau « air sec », des sondes et de leur câblage. L'étanchéité est sollicitée en exploitation par les mouvements du câble et la dilatation différentielle des divers composants du système. Le monitoring doit aussi pouvoir permettre de contrôler, l'étanchéité de la gaine, des colliers et des joints.

Le suivi et le contrôle des données fournies par le monitoring nécessite un enregistrement qui peut se faire sur place depuis un ordinateur, placé par exemple dans une chambre d'ancrage, ou à distance via un système d'envoi des données. L'expérience a montré qu'il est préférable que les données soient directement envoyées pour une plus grande réactivité.

Une inspection visuelle périodique sur site de l'ensemble est toutefois nécessaire, par exemple tous les ans par exemple.

Les câbles ne sont pas visibles et difficilement accessibles sous les colliers et sous la gaine. Il est possible de prévoir dès la phase de conception des fenêtres d'inspection et/ou trappes de visite afin vérifier visuellement l'état des câbles.

Le dimensionnement du système de déshumidification est empirique. Il est essentiel d'avoir la possibilité d'ajuster le système lors de l'installation et même pendant l'exploitation. Les exemples japonais montrent que les premières années d'observation permettent généralement une optimisation du système mais aussi une réduction des coûts de fonctionnement : modification du nombre et de l'emplacement des points d'injection et d'extraction et éventuellement modification du nombre de déshumidificateurs.

Lorsque la pression d'air au point d'extraction de la gaine n'est pas suffisante, la solution consistant à augmenter la pression au point d'injection a été testée et a provoquée des fuites dans l'étanchéité des systèmes. Désormais, on réduit la distance entre le point d'injection et le point d'extraction.

Au Japon, tout le système est analysé en fonction des mesures et des résultats des réparations lors d'une revue annuelle.

5 - Surveillance effectuée dans le cadre du patrouillage de surveillance générale du réseau

Lorsque le réseau routier fait l'objet d'un patrouillage, les éléments suivants peuvent souvent être remarqués :

- signe de déplacement d'un ancrage (bourrelet d'enrobé, flambement de bordure, etc.) ;
- câble rompu ou pendant ;
- suspente rompue ;
- glissement important de suspente ;
- mise en butée de tablier ;
- désordres sur les joints de chaussée (ouverture, désaffleurement, battement, etc.) ;
- déversement anormal des poutres de rigidité ;
- déversement des plans de suspension.

6 - Contrôle annuel

Pour ce type de structure, le contrôle annuel est plus détaillé que pour un ouvrage classique.

La visite annuelle est effectuée sans moyen d'accès particulier. Elle doit être effectuée en gardant en mémoire les points les plus sensibles de ce type de structure.

Il est intéressant d'en bâtir un cadre adapté à chaque ouvrage. Une forme constante facilite les comparaisons et les recherches d'évolution.

6.1 - Approche globale de l'ouvrage

L'approche globale de l'ouvrage devra être particulièrement minutieuse dans le cas des ponts suspendus :
- recherche de trace de mouvement autour des ancrages ;
- contrôle de la verticalité longitudinale et transversale des pylônes ;
- profil en long du ou des tabliers (rectiligne, convexe, concave).

6.2 - Suspension

- Déversement de nappes ;
- examen des culots d'ancrage (recherche de fils rompus à la sortie des culots) ;
- présence de gonfles ;
- présence de fils rompus ;
- verticalité et parallélisme des suspentes (glissement des attaches supérieures) ;
- état des articulations hautes et basses des suspentes (existence, fonctionnement, grippage, mise en butée, etc.) ;
- sur les ouvrages légers à suspentes rapprochées, la tension des suspentes peut être sondée à la main (détection éventuelle de suspente détendue) ;
- état de la protection anticorrosion.

6.3 - Tablier

- Profil en travers du tablier (poutres verticales, déversées, profil en travers horizontal ou non) ;
- état global de la charpente métallique ;
- état global de la protection anticorrosion ;
- état global de l'étanchéité.

6.4 - Chaussée et trottoirs

- Défauts de surface fissures ;
- état des bordures.

6.5 - Joints de chaussée et de trottoirs

- État des solins ;
- état des joints de caoutchouc ;
- ouverture des joints ;
- les mesures des ouvertures de joints doivent être accompagnées de mesures de température.

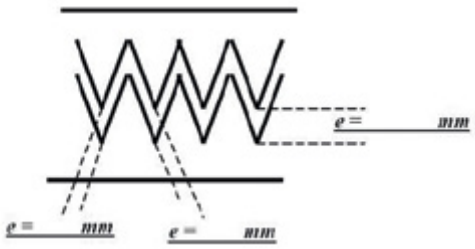


Figure 104 : Ouverture d'un joint à peigne

Figure 105 : Ouverture d'un joint à hiatus

6.6 - Appareils d'appui

- État des fixations et scellements ;
- existence de déformations, jeu (battement au passage de véhicules) etc. ;
- position lors de la visite :
  - exemple : mesure d'inclinaison des bielles,

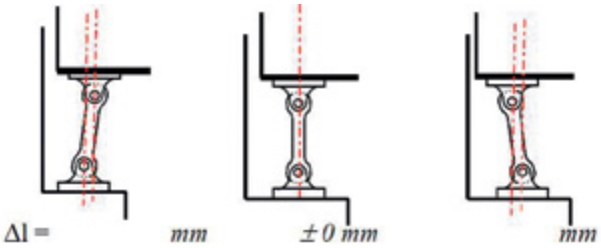


Figure 106 : Mesure de l'inclinaison d'une bielle

- la mesure d'inclinaison des bielles doit être complétée par la mesure de la température.

6.7 - Dispositifs de retenue

Les amplitudes de déplacement inhabituelles peuvent poser des problèmes en extrémité de tablier.

6.8 - Dispositifs d'évacuation des eaux

Dans le cas de recueil des eaux de tablier à l'aide de canalisations longitudinales, des amplitudes de déplacement inhabituelles peuvent poser des problèmes en extrémité de tablier.

7 - Visite d'évaluation

Dans la mesure où le contrôle annuel est plus détaillé que pour un ouvrage classique, il est pertinent, comme pour les tunnels et tranchées couvertes, de remplacer la visite d'évaluation effectuée tous les 3 ans par une cotation à la même fréquence basée sur les inspections détaillées et les rapports de visites annuelles (*cf.* fascicule 2 de l'ITSEOA).

8 - Inspections détaillées

8.1 - Fréquence et objectifs des inspections détaillées

Les inspections détaillées sont dans les cas courants effectuées tous les six ans. Leurs principaux objectifs sont les suivants :

- exhaustivité des constatations visuelles ;
- avis sur l'état de l'ouvrage ;
- proposition des actions à entreprendre (mesures d'entretien ou études et/ou investigations complémentaires).

Les particularités des inspections détaillées des ponts suspendus sont présentées pour chacune des trois grandes étapes d'une inspection (préparation, inspection, rédaction du rapport).

8.2 - Préparation

8.2.1 - La pré-visite

Lorsque l'ouvrage n'est pas bien connu, une pré-visite doit être faite pour permettre une bonne organisation de l'inspection et déterminer les moyens d'accès nécessaires.

Une nacelle élévatrice est toujours nécessaire. Ses caractéristiques sont choisies en fonction :
- de la hauteur des pylônes ;
- de la largeur de la chaussée ;
- de la limitation de tonnage.

Tous les moyens d'accès aux différentes parties de l'ouvrage doivent être envisagés : culées, piles, massifs d'ancrage, intrados. On notera que l'accès à l'extérieur du tablier et sous celui-ci est parfois compliqué par la présence de la suspension.

En ce qui concerne les accès, il est souvent fait appel à des cordistes. Ceux-ci peuvent placer des équipements de sécurité provisoires (mains courantes, filets, lignes de vie), mais ils peuvent aussi accompagner et sécuriser les inspecteurs pour accéder aux zones difficiles. Les cordistes peuvent, dans des cas extrêmes, effectuer eux-mêmes certaines parties de l'inspection. Il est aussi de plus en plus souvent envisagé de faire appel à des drones mais leur utilisation reste complexe (localisation, qualité des images, etc.).

8.2.2 - L'étude du dossier d'ouvrage

Avant l'inspection détaillée, une étude du dossier d'ouvrage est souvent nécessaire pour bien appréhender la conception, le fonctionnement et les désordres éventuels de l'ouvrage.

Pendant cette étude, l'attention sera portée notamment sur :
- la conception (fonctionnement de l'ouvrage) ;
- la construction/les interventions de réparation (historique) ;
- les IDP précédentes et visites ;
- les matériaux (existence éventuelle de matériaux fragiles).

8.3 - Les six grandes phases de l'inspection détaillée

L'inspection détaillée comporte six grandes phases.

8.3.1 - L'approche générale

L'approche générale permet de comprendre le type de l'ouvrage et son fonctionnement :
- câble de têtes ? de briquet ? ;
- type d'ancrage ;
- type de suspension (mixte, etc.) ;
- système d'appuis ;
- étudier les profils (long, travers, verticalité des appuis, parallélisme des câbles, des suspentes).

8.3.2 - L'examen de la suspension

- Examen du profil en long et en travers des nappes ;
- recherche de glissements au niveau des chevalets et colliers des suspentes ;
- vérification du serrage des boulons de fixations (colliers, suspentes, dispositifs de retenue des suspentes) ;
- évaluation sommaire de l'égalité des tensions dans les suspentes et haubans (mise en vibration à la main) ;
- examen de l'état des câbles (recherche de fils rompus, détoronnés, de gonfles, de traces de corrosion, état de la protection anticorrosion). En particulier, examiner les points sensibles (voir 4.1) ;
- examen des culots et étriers des câbles, notamment de l'état de la protection anticorrosion, des éventuelles infiltrations d'eau et traces d'oxydation.

8.3.3 - L'examen des ancrages

- Vérifier la stabilité/fissuration du massif sans oublier que la zone d'influence du massif peut s'étendre sur une plusieurs dizaines de mètres ;
- les tirants sont des éléments sensibles et sont à contrôler avec attention ;
- les culots et leurs protections doivent être examinés ;
- inspecter minutieusement l'ensemble des chambres d'ancrage.

8.3.4 - L'examen des appuis

Il s'agit des selles de déviation, des béquilles d'infléchissement/épanouissement, des chariots de dilatation, des butées au vent, des systèmes d'anti-soulèvement, des bielles et des piles. On s'attachera à :

- comprendre et vérifier le fonctionnement de l'ensemble des appareils d'appui (mouvements thermiques, butée au vent, anti-soulèvement, rotations, articulations) ;
- inspecter les zones de transfert de charges autour des appuis.

8.3.5 - L'inspection des superstructures

L'inspection des superstructures d'un pont suspendu ne diffère pas de celle d'un pont courant.

8.3.6 - L'examen de l'intrados

L'examen de l'intrados permet de prendre connaissance de l'état des éléments clefs de la structure portant la chaussée. À cette occasion, poutres, pièces de pont, cornières, attaches de suspentes, fixations, longrines, longerons, entretoises, joints de chaussée et de trottoir doivent être inspectés avec le plus grand soin.

8.4 - La rédaction du rapport

Le rapport d'inspection détaillée d'un pont suspendu ne différant pas de celui des autres ponts de la liste II, on se référera utilement à la forme du rapport défini dans le fascicule 2 de l'ITSEOA. Le maintien d'un plan stable d'une visite à l'autre facilite les comparaisons et recherches d'évolutions.

9 - Exemples de programme de surveillance

On peut envisager la possibilité, (comme dans le cas des tunnels et tranchées couvertes) de remplacer la visite de cotation effectuée tous les 3 ans par une cotation à la même fréquence basée sur les inspections détaillées et rapports de visites annuelles (*cf.* fascicule 2 de l'ITSEOA).

9.1 - Exemple de programme pour un petit ouvrage suspendu

Nature des interventions	Fréquence	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Contrôle annuel	Annuel	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Inspection détaillée	Tous les 6 ans		✓						✓				
Évaluation IQOA	Tous les 3 ans		✓			✓			✓			✓	

Figure 107 : Programme de surveillance d'un petit ouvrage

9.2 - Exemple de programme pour un grand ouvrage suspendu

Du fait des contraintes d'accès à certaines parties d'ouvrage, des interventions d'entretien sont régulièrement couplées avec des actions de surveillance comme dans cet exemple relatif à un très grand pont où les principes exposés ci-après ont dû être adaptés.

Localisation des interventions	Nature des interventions	Fréquence	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Système de déshumidification des câbles porteurs	Contrôles et entretien courant	Trimestrielle	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Parties courantes de l'ouvrage sans moyen particuliers	Visites annuelles – Entretien courant	Annuelle avec interventions mensuelles	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Entretien des passerelles mobiles de visite et monte-charge	Entretien des moteurs et contrôles	Annuelle	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Accès à l'ensemble de l'ouvrage	Contrôle des dispositifs de sécurité (lignes de vie, ancrages....)	Annuelle	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Appareils d'appui	Visite spécifique	Annuelle	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Colliers	Contrôles et graissages (tiges et colliers rotulés)	Tous les 2 ans avec interventions annuelles	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Câble porteur	Vérification de la totalité de la surface de la gaine	Tous les 2 ans avec interventions annuelles	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Partie suspendue	Visite de cotation et synthèse des contrôles précédents	Tous les 3 ans		✓			✓			✓			✓	
Ensemble de l'ouvrage	Contrôle géométrique (À l'étude un système de contrôle géométrique continue)	Tous les 5 ans	✓					✓					✓	
Partie suspendue	Inspection détaillée	Tous les 6 ans		✓						✓				
Appuis immergés	Visite par plongeurs	Tous les 6 ans	✓						✓					
Évaluation IQOA	Analyse des PV de visites annuelles et des rapports d'inspections détaillées	Tous les 3 ans		✓			✓			✓			✓	

Figure 108 : Programme de surveillance d'un grand ouvrage

10 - Surveillance renforcée et haute surveillance

10.1 - Surveillance acoustique

Le fonctionnement d'une surveillance acoustique est basé sur la détection des ruptures de fil dans un câble, extérieur ou non, par enregistrement de la vibration créée par l'onde de choc générée par la rupture.

La localisation se fait par l'intermédiaire de la datation très précise au niveau de chaque capteur (datation à la microseconde), de la connaissance de la position des capteurs et de la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau.

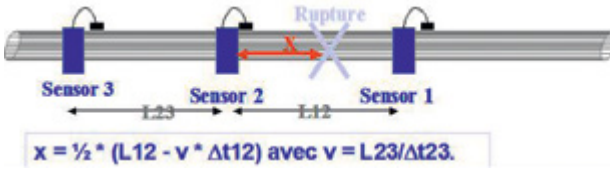


Figure 109 : Formule de détermination de la position de la rupture

Une rupture de fils sous contrainte génère une onde mécanique dont la propagation se fait le long de la structure et plus particulièrement le long du câble. Ainsi des capteurs disposés le long de ce câble ou à proximité sont en mesure de détecter l'onde de choc à différents points et instants sur le linéaire du câble. Une telle onde peut cependant être consécutive à différents types d'événements.

L'efficacité de cette méthode dépend de l'ouvrage et de la structure des câbles. Sur certains ponts, on détecte de nombreux événements et il est parfois délicat de déterminer s'il s'agit de ruptures de fils (l'enregistrement du signal permis par certains systèmes est une aide à la discrimination des événements). Dans le cas de câbles en faisceaux, on peut se poser la question de détection de ruptures profondes dans la mesure où les ondes de choc correspondantes ont un très grand nombre d'interfaces à franchir. Par contre, cette méthode permet de détecter des ruptures se produisant dans les parties non accessibles de l'ouvrage (culots, colliers, etc.), ce qui présente un avantage par rapport aux autres techniques non destructives.

Il est donc prudent de ne pas utiliser cette méthode seule dès que la question de la sécurité de l'ouvrage se pose. Il faut plutôt l'associer avec d'autres modes de surveillance (inspection visuelle périodique des couches externes par exemple).

Cette méthode permet de détecter en temps réel des ruptures et de générer des alarmes «structure» sur seuils prédéfinis (dont l'établissement est souvent complexe et délicat).

Lors de la détermination des seuils se posent les questions suivantes :
- de quel état zéro part-on lors de l'installation du système ?
- comment peut-on corréler le nombre de ruptures constatées, la résistance résiduelle du câble et son évolution ?
- jusqu'à quel niveau de résistance résiduelle du câble peut-on exploiter l'ouvrage ?

La réponse à ces questions est complexe et passe généralement par les étapes suivantes :
- recalcul de l'ouvrage avec différentes hypothèses d'exploitation ;
- analyse des modes de rupture du pont ;
- analyse des modes de rupture du câble ;
- évaluation de la capacité résiduelle du câble lors de l'installation de la surveillance.

Toutes les réponses ne sont pas toujours accessibles.

Dans les cas favorables, cette analyse aboutit à une procédure de surveillance.

Voici quelques éléments extraits de procédures de haute surveillance :
- la procédure ne se réfère pas à un mode de surveillance unique ;
- différents niveaux de seuils sont établis : ils correspondent à différents niveaux d'alerte et/ou différents niveaux de restriction d'exploitation ;
- sont interprétés à la fois le nombre de ruptures détectées (ou constatées) mais aussi la cinétique (nombre rupture/unité de temps) et la localisation ;
- les seuils sont établis pour la totalité d'un câble mais aussi pour un intervalle glissant sur le câble.

10.2 - Suivi géométrique

Un suivi géométrique est intéressant dans la mesure où ces structures sont souples et s'adaptent aux charges par grands déplacements. Un suivi géométrique bien conduit et correctement exploité permet de détecter plus tôt une évolution anormale du comportement de l'ouvrage et ses résultats constitueront une aide au diagnostic.

Il est plus significatif de suivre l'évolution de la position de quelques points judicieusement choisis que d'effectuer périodiquement des levés topographiques étendus de la structure.

Le suivi géométrique devra être associé à des mesures de température et les comparaisons doivent s'effectuer sur des géométries corrigées des effets de la température.

10.2.1 - Points à contrôler

Un suivi géométrique est particulièrement pertinent sur les éléments suivants :

- position des massifs d'ancrage ;
- position des têtes de pylônes et des chariots, si ceux-ci sont mobiles : déplacements horizontaux longitudinaux et transversaux ;
- positions de points caractéristiques sur les tabliers (sur chaque rive à la moitié et aux quarts de la longueur de travée) ;
- position des sellettes de déviation ;
- ouverture des joints de chaussée.

Lors des visites annuelles et des inspections, la mesure des petits déplacements sur les joints et les positions des sellettes peut être facilitée par le positionnement à demeure de réglets et de repères.

Dans le cas d'un ouvrage monitoré, des enregistrements de distances peuvent être effectués en utilisant des capteurs de déplacements.

10.2.2 - Tableau comparatif

Éléments 2014	Distance utile	Précision	Avantages	Limites	Observations
Topographie traditionnelle	Automatique jusqu'à 1 000 m sinon jusqu'à 3 000 m	Fraction de mm jusqu'au cm pour les grandes distances	Coût pour ouvrage modeste ou moyen, bien adapté aux relevés ponctuels	Nécessite une co visibilité ou plusieurs stations. Temps de mesure d'un point 3 à 7 s	Adapté à des ouvrages modestes ou moyens. Possibilité de matériel permanent pour les grands ouvrages
Méthodes de positionnement par satellite	Pas de limitation	Cm en temps réel, 3 à 5 mm avec post traitement	Pas de limitation de la taille de la structure. Précision indépendante de la distance. Adapté à de la mesure à haute fréquence (même en précision maximum avec traitement différé	Nécessite une alimentation et une antenne par point de mesure	Adapté pour des mesures automatiques sur les grandes structures
Scanner laser	Jusqu'à 2 000 m	Plus faible que les précédents, hétérogène suivant les directions	Facilité de mise en œuvre, en particulier pour les parties inaccessibles (suspension)	Nombre de points. Difficulté de traitement des données. Précision	Adapté à des examens ponctuels d'éléments structurels difficilement accessibles (ex. la suspension)

Figure 110 : Tableau comparatif des différentes méthodes de suivi géométrique

Chapitre **5**

Entretien

1 - Entretien courant

1.1 - Appareils d'appui

L'entretien courant des appareils d'appui est limité. Il consiste en un graissage, une opération facilitée s'ils sont munis de graisseurs.

1.2 - Protection anticorrosion des câbles et suspentes

L'entretien courant de la protection anticorrosion des câbles et des suspentes est primordial. L'entretien de la charpente métallique du tablier et éventuellement des pylônes ne doit cependant pas être négligé.

L'entretien de la protection anticorrosion s'effectuera conformément aux conseils et prescriptions du fascicule 33 de l'ITSEOA.

1.3 - Ensemble de l'ouvrage

Les précautions usuelles restent nécessaires (faire nettoyer et enlever les détritus et la végétation qui maintiennent une humidité constante) et sont à étendre à l'ensemble de la suspension, en particulier le niveau des ancrages ou des bas de suspentes. De même, les chambres d'ancrage seront nettoyées et largement ventilées.

2 - Entretien spécialisé

2.1 - Appareils d'appui

L'entretien spécialisé des appareils d'appui est limité. Il consiste à changer les pièces d'usure lorsque des battements sont détectés (si cela a été prévu lors de leur conception).

2.2 - Entretien d'une déshumidification

L'entretien spécialisé d'une déshumidification vise à maintenir l'efficacité de celle-ci en s'appuyant sur le monitoring du système, les visites périodiques des déshumidificateurs et les examens visuels de la gaine et des différents dispositifs.

2.2.1 - Les déshumidificateurs

Leur entretien est prévu par le fabriquant mais le monitoring peut également transmettre des alertes de défauts. Le gestionnaire a tout intérêt à prévoir un stock de matériel de remplacement (ex : filtres) et un contrat d'entretien. En cas de problème sur les déshumidificateurs, il est important d'intervenir rapidement pour ne pas laisser les conditions ambiantes se dégrader à l'intérieur de la gaine.

2.2.2 - Gaines, étanchéité des joints et colliers

Les gaines endommagées ou percées doivent être réparées et les joints qui ont perdu leur étanchéité doivent être remplacés. Les exemples à l'étranger montrent que malgré toutes les précautions prises, il est inévitable d'intervenir au moins une fois par an pour réparer les fuites dans l'étanchéité : l'étanchéité étant un des points faibles du système

de déshumidification. Il existe une méthode efficace de réparation de la gaine (prévue par le fournisseur). Par contre, les fuites au niveau des joints sont le plus souvent difficilement visibles à l'œil nu. L'air étant en surpression, il est possible de les détecter par une méthode simple (savon), mais cela nécessite une auscultation de l'ensemble du système.

2.2.3 - Le monitoring

Les données du monitoring permettent d'analyser son propre état de fonctionnement. Il faut s'assurer d'avoir toujours des appareils en bon état de marche, suffisamment précis et fiables (étalonnage). L'accès à ces appareils et leur vérification doivent être prévus dès la phase de conception du système. La sauvegarde des données est un élément important pour vérifier et prouver l'efficacité du système sur le long terme.

La durée de vie des éléments constituants le système de déshumidification est très variable. Elle peut varier de quelques mois (consommables pour les déshumidificateurs) à plusieurs dizaines d'années pour la gaine par exemple. On ne dispose pas d'un recul suffisamment long sur les durées de vie des éléments constituants la déshumidification. On trouve toutefois dans la littérature des durées de vie escomptées :

- bande élastomère : 30 ans ;
- flexibles et éléments exposées aux intempéries : 30 ans ;
- déshumidificateurs : 60 ans pour un système basique sans fréon mais à base de moteur électrique tournant lentement et non continûment. À titre de comparaison, la fréquence d'une remise en peinture avec décapage total est d'environ 15-20 ans.

La déshumidification nécessite une consommation d'énergie permanente qui peut être optimisée mais pas annulée.

2.3 - Protection périodique du système anticorrosion de la suspension

On effectuera des réparations localisées ponctuelles du système de peinture afin de limiter l'extension des désordres. Ceci permet souvent de repousser une réfection totale de la protection anticorrosion.

On remplacera les mastics poreux, fissurés ou décollés.

2.4 - Réfection totale de la protection anticorrosion des suspensions

La consistance des travaux de remise en peinture des câbles dépend étroitement de l'environnement de l'ouvrage, de la nature et de l'état de la protection en place.

Il est nécessaire suivre une démarche chronologique dans le but d'éviter ou du moins de limiter les aléas pendant les travaux.

La démarche doit s'appuyer sur l'annexe 4 du fascicule 56 du CCTG (même s'il ne s'applique pas aux câbles) et sur le guide technique LCPC « Entretien de la protection anticorrosion des ouvrages métalliques ».

Le diagnostic est basé sur la recherche documentaire et sur la visite de reconnaissance. Il permet de statuer sur l'état de la protection puis de définir la consistance envisageable des travaux. Il doit cependant être complété par une caractérisation et une classification des déchets, surtout en présence d'amiante, de plomb et de métaux lourds.

2.4.1 - Définition de l'opération de remise en peinture

La première étape consiste à effectuer un diagnostic de l'état de la protection en place afin de déterminer :

- l'environnement de l'ouvrage (classe de corrosivité : zones industrielles, environnement marin etc.) ;
- la consistance des travaux à envisager.

Deux points forts sont à prendre en compte lors de l'analyse des orientations possibles :

- l'apparition de la partie galvanisée suite à la destruction de la peinture est un critère d'urgence pour décider d'une réfection du complexe anticorrosion (l'objectif idéal étant d'intervenir avant le début de la consommation du zinc) ;
- la présence d'éléments toxiques dans la peinture milite pour un décapage complet (en excluant les solutions d'avivage) afin de limiter les précautions les plus lourdes à un seul chantier. (Dans le cas de produits toxiques, une remise en peinture après un simple dépoussiérage et/ou lavage permet de différer l'investissement lourd correspondant au renouvellement complet du complexe anticorrosion).

2.4.2 - Recherche documentaire

Lorsqu'on dispose des archives de l'ouvrage, la recherche documentaire vise à connaître avec précision la nature du subjectile, c'est-à-dire si le câble est galvanisé ou non, ainsi que l'historique des différentes remises en peinture.

2.4.3 - Visite de reconnaissance

Au cours de la visite préalable, il faut prélever des échantillons de peinture en vue d'analyse.

Dans le cas où l'information n'est pas disponible, l'examen visuel ne permet pas toujours de déterminer si le fil est galvanisé ou non.

Le guide LCPC donne alors des conseils pour la reconnaissance du subjectile.

Il est conseillé d'effectuer des prélèvements pour la recherche de présence d'amiante dès cette phase, même si la recherche documentaire permet de penser qu'il n'en existe pas, car cette donnée reste fondamentale pour l'orientation des autres investigations.

2.4.4 - Essai préalable de décapage

Les objectifs de l'essai de décapage sont les suivants :

- valider la faisabilité de la méthode de décapage envisagée ;
- tester la compatibilité des peintures avec les anciens fonds (sur les câbles le décapage permet rarement d'enlever complètement l'ancien complexe dont la nature n'a pas toujours été déterminée lors de la recherche documentaire) ;
- évaluer la dangerosité des déchets (détermination de la filière de gestion des déchets : récupération, stockage transport, élimination, stockage, protection des opérateurs).

Les rendements et la quantité des déchets, classés d'office en déchets dangereux en cas de présence d'amiante, seront établis par rapport à la connaissance bibliographique des rendements et aux quantités produites sur des ouvrages similaires, ou par un calcul théorique.

Les essais de décapage peuvent aussi être transformés en essais de lavage (pour les câbles clos) ou essais de brossage, selon les nouveaux complexes envisagés, avec qualification de la dangerosité des produits résiduels des eaux de lavage afin de préparer les dossiers réglementaires.

2.4.5 - Consistance des travaux

Choix de la préparation du support et du type de complexe

La présence de galvanisation sur les fils est un élément déterminant pour ces choix. Si les fils sont galvanisés, il faut absolument chercher à conserver cette galvanisation. Il faut donc intervenir dès que la première couche est visible. Cette contrainte milite pour l'utilisation d'un primaire d'une couleur différente, son atteinte par l'abrasion sera alors plus facilement détectable.

On cherchera dans le cas de fils galvanisés à privilégier les solutions d'avivage afin de préserver au maximum la galvanisation.

Dans le cas de fils clairs on peut se rapprocher des conseils du guide technique du LCPC conseillant de limiter à une seule fois la possibilité d'avivage. Dans le cas d'un décapage primaire (décapage total), la permanence de fonds dans les zones inter filaires impose le choix d'un complexe compatible avec ces fonds.

Une fois le diagnostic effectué et les possibilités et méthodes de remplacement du complexe anticorrosion listés, d'autres critères sont à intégrer pour effectuer le choix définitif :

- conception du confinement ;
- prise en compte des contraintes d'exploitation de l'ouvrage pendant le chantier ;
- coût.

Conception du confinement

Figure 111 : Exemple d'un confinement de câbles porteurs

La conception du confinement est devenue un point majeur de l'organisation de ce type de travaux.

Elle va être déterminée par les éléments suivants :

- contraintes d'exploitation du tablier pendant les travaux ;
- actions verticales admissibles par la structure (ces actions intègrent les charges de personnel, de matériel et liés aux produits de décapage ; elles doivent être considérées avec les charges concomitantes du tablier) ;
- actions dues au vent (en concomitance des charges précédentes).

Le confinement peut se limiter au câble porteur ou régner sur toute la hauteur de la suspension (pour les petits ouvrages). Il est généralement phasé ou mobile. Des procédures d'exploitation sous surveillance météorologiques avec détermination de seuil de vitesses de vent peuvent être utilisées afin d'augmenter la taille des confinements ou de simplement rendre les travaux possibles. Dans ce cas, les travaux doivent être effectués avec une mesure permanente des vitesses de vent et la surveillance d'atteinte de seuils de vitesses de vent (seuils d'évacuation du confinement-démontage des bâches de confinement-remontage des bâches).

La procédure d'utilisation doit intégrer une limitation du stockage des produits (neufs et produits de décapage) cohérente avec les hypothèses de dimensionnement.

Les préoccupations d'hygiène et sécurité sont déterminantes pour la conception des accès et de certains équipements du confinement (ventilation, filtration d'air, etc.).

Lorsque des platelages provisoires sont utilisés, il faut les placer autant que possible au-dessus des PHE. Si cela n'est pas possible, l'entreprise devra établir une procédure de gestion de crise et la mettre en œuvre pendant les crues (gestion des déchets, dépose des platelages, etc.).

2.5 - Réglage de suspension

Certaines pathologies sont les conséquences d'un déréglage de suspension. Des surcharges d'appareils d'appui peuvent provoquer une usure prématurée, un déréglage de suspension peut introduire de la flexion dans les poutres de rigidité de l'ouvrage à vide et provoquer leur surcharge lors du passage des véhicules (on a régulièrement constaté des amorces de flambement des membrures supérieures des poutres de rigidité latérales).

Le réglage de suspension nécessite une étude détaillée.

Le déréglage de suspension conduit à une hétérogénéité de la tension dans les suspentes et donc à des surtensions. Théoriquement le risque de rupture est accru bien que de tels cas ne semblent jamais avoir été rapportés. Le déréglage des suspensions est le plus souvent dû à un glissement des attaches de suspentes sur le câble porteur. Dans les ouvrages anciens, les dispositifs empêchant le glissement des attaches sur le câble peuvent être très sommaires.

Le déréglage peut aussi avoir d'autres origines : « fluage » des câbles porteurs, tassement du zinc dans les douilles de culots mal exécutés, etc.

2.5.1 - Les objectifs du réglage

Les objectifs du réglage sont d'obtenir à la température théorique de référence la géométrie voulue et l'état de sollicitation recherché, à savoir :

- iso tension dans les câbles élémentaires constituant le câble porteur ;
- pylônes verticaux et en compression simple ;
- géométrie de construction du tablier ;
- suspentes en iso tension. (Ces deux derniers critères sont interdépendants avec des tabliers rigides) ;
- charge des appareils d'appui : Les suspentes situées à proximité des appuis peuvent être tendues à une valeur différente afin de prendre en compte l'effet de bord et/ou afin d'imposer une déformation volontaire du tablier pour limiter la fréquence des changements de signes des réactions d'appui au passage des véhicules lourds.

2.5.2 - Méthodologie(s) de réglage

Les objectifs du réglage doivent être clairs quand on en détermine la méthodologie.

Il est recommandé d'évaluer par calcul les éléments suivants :

- plages de déplacement admissibles par le pylône et le tablier ;
- relation effort/déplacement aux ancrages de câbles et pied de suspentes ;
- effet d'une imprécision de 1 ou 2 % de la force dans les suspentes sur la position du tablier ;
- sensibilité au risque de glissement d'un câble sur une selle ou d'un déplacement hors tolérance d'une selle mobile ;
- influence de la température sur la géométrie cible du réglage.

Ces structures sont souples et présentent un comportement non linéaire : Il est donc recommandé d'effectuer les opérations de réglage en utilisant les variations de géométrie plutôt que les variations d'efforts. Ces opérations s'effectuent sous contrôle en temps réel de la géométrie de points clefs sur la structure en prenant en compte la température lors de la mesure.

Les réglages sont réalisés à l'aide de systèmes de transfert de charges. Le principe est le suivant : on adapte à l'extrémité de l'élément que l'on souhaite régler un dispositif provisoire qui permet de faire transiter l'effort dans des vérins (creux ou classiques. Une fois vérifié que tout l'effort transite bien par les vérins, on peut mesurer l'effort de traction, le modifier, allonger ou raccourcir l'élément.

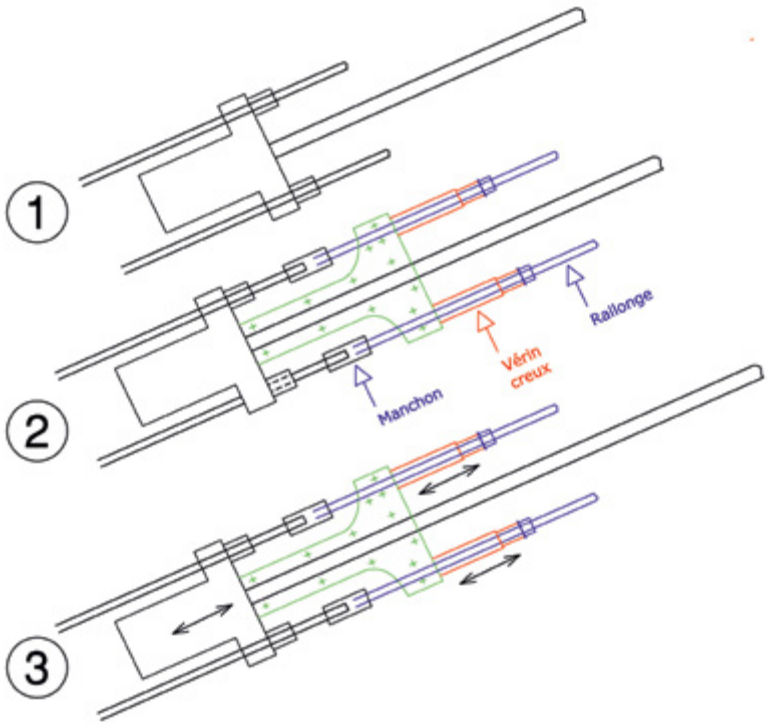


Figure 112 : Principe d'un système de transfert de charges

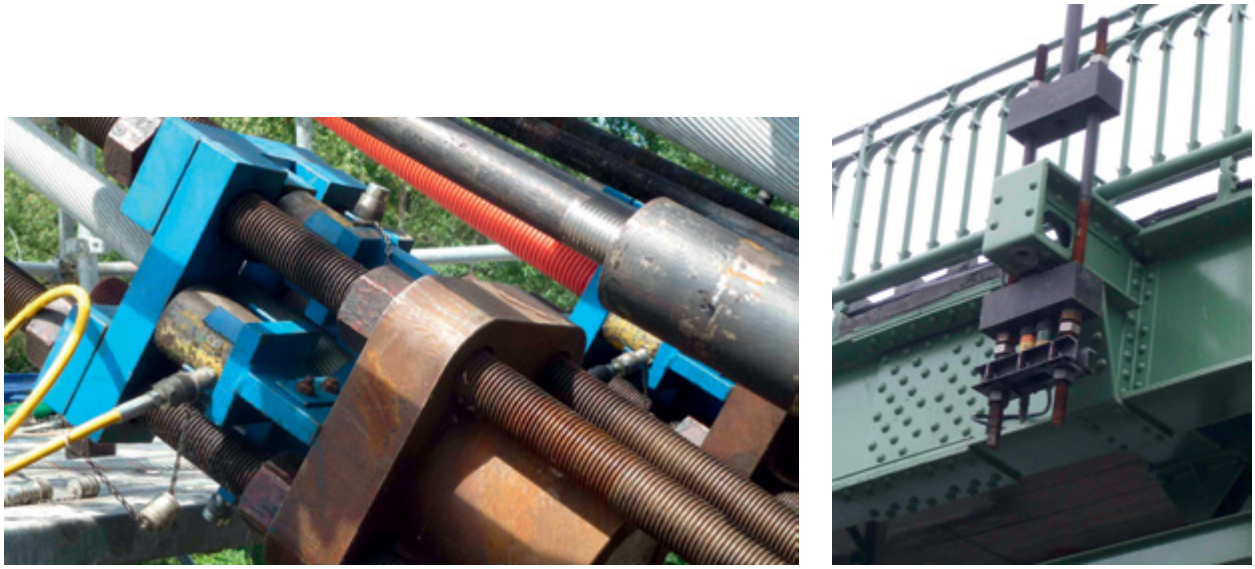


Figure 113 : Exemples de dispositifs de transfert de charges

Dans le cas d'un réglage complet, la chronologie logique des opérations est la suivante :

- à partir des ancrages des câbles porteurs, réglage de l'iso tension dans les torons élémentaires de la position des selles et/ou verticalité des pylônes ;
- réglage de la verticalité des suspentes. Pour les suspentes ayant glissé, il faut les détendre (après avoir placé des suspentes provisoires) replacer l'attache haute et remettre la tension initiale dans la suspente. S'il n'existe pas de dispositif efficace pour éviter le glissement, il convient de l'ajouter et d'effectuer les traitements anticorrosion nécessaires ;
- réglage de la tension des suspentes et de la géométrie du tablier : on place un dispositif de transfert de charge sur chaque suspente (au minimum sur un coté du tablier sur la totalité de sa longueur dans le cas des tabliers souples en torsion. Dans le cas des tabliers rigides en torsion il conviendra de régler les deux côtés simultanément. Dans le cas des tabliers rigides en torsion, les deux côtés doivent être réglés simultanément). Dans le cas de tabliers rigides en torsion, les 2 côtés doivent être réglés simultanément. La mise en charge des vérins de transfert permet de peser chaque suspente et donc de vérifier le poids linéique moyen du tablier. Un calcul sur un modèle de poutre simple permet d'estimer les charges sur appareils d'appuis et dernières suspentes (effet de bord), ces charges correspondent au cas idéal d'un tablier réglé sans flexion générale. Le réglage consiste ensuite à mettre les suspentes à leur tension théorique (généralement iso tension à l'exception éventuelle des suspentes d'extrémité). Le branchement des vérins sur la même voie hydraulique garantit l'iso tension qui doit être complétée par le réglage altimétrie du tablier au niveau le plus proche possible de celui de sa construction (tablier sans flexion générale).

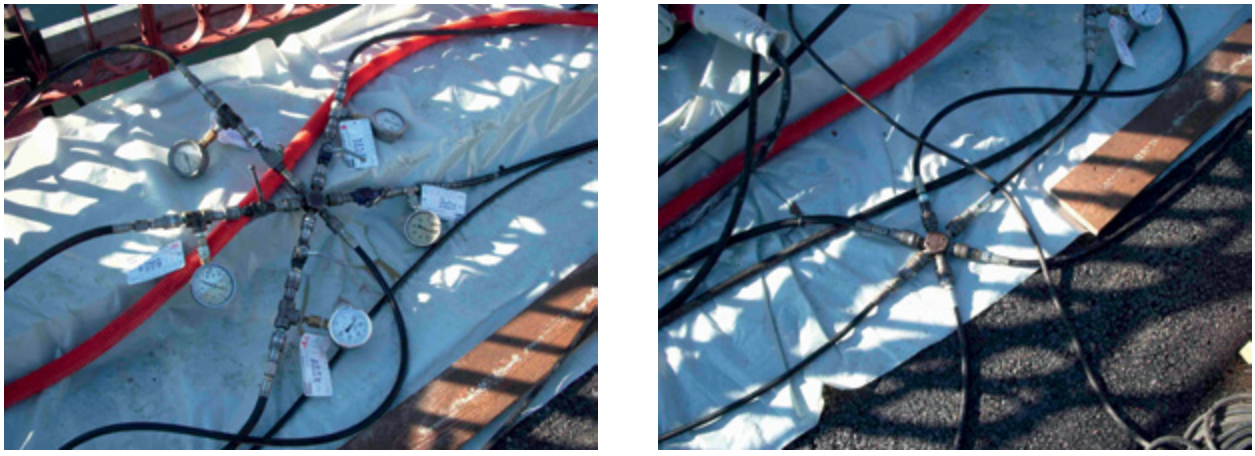


Figure 114 : Circuits hydrauliques et manomètres de contrôle utilisés lors d'une isotension

2.5.3 - Un point particulier : les appareils d'appui

Les appareils d'appui constituent un problème particulier lors du réglage : ils forment un point dur pour la distribution des efforts et un point imposé pour le réglage des niveaux. Des procédures constituant à désaccoupler les appareils d'appui et à poser les abouts de tablier sur des vérins (qui peuvent aussi servir de peson lors des phases de réglage) sont théoriquement idéales mais au prix de difficultés technologiques (démontage et remontage des appuis, conservation des abouts à un niveau imposé lors des phases de réglage).

Lors du passage d'une charge sur un tablier suspendu, si celle-ci est suffisamment importante par rapport aux charges permanentes, les réactions d'appui changent de signe, c'est ce qui impose une conception particulière des appareils d'appui. Ces changements de signes, s'ils sont fréquents, sont agressifs pour les appuis et leurs fixations. Il a souvent été essayé de forcer la valeur de la réaction d'appui en modifiant la tension de la ou des deux dernières suspentes afin d'avoir une réaction plus élevée en valeur absolue et limiter ainsi la fréquence des changements de signes. Cette solution souvent utilisée de manière empirique présente l'inconvénient d'écarter le tablier de son schéma de fonctionnement théorique optimal.

Des essais d'obtention du même résultat à partir de lest et donc sans modifier le fonctionnement de la poutre de rigidité ont été effectués avec des résultats satisfaisants.

2.5.4 - Conclusion

Le réglage de suspension est une opération nécessaire dès que l'on modifie la répartition des poids sur le tablier (il est toujours recommandé de travailler à poids constant sur un pont suspendu), ou que l'on effectue sur la suspension des travaux de nature à changer sa géométrie. La décision est plus difficile à prendre quand on constate un affaissement progressif mais modéré du tablier (fluage des câbles par exemple) ou une hétérogénéité de la tension dans les suspentes. Le seuil acceptable doit alors être déterminé en examinant le niveau de sécurité des suspentes et son altération due au déréglage. Certaines structures de tabliers à suspentes espacées peuvent aussi être endommagées par le déréglage (augmentation des flexions locales à un niveau inacceptable). Le programme du réglage lui-même doit être précisé en fonction des paramètres à corriger (isotension des câbles élémentaires, position des selles et pylônes, verticalité des suspentes et niveau du tablier).

Chapitre **6**

Diagnostic et réparation

La lecture attentive du dossier d'ouvrage et l'examen visuel des parties de structure concernées restent un préalable indispensable à tout diagnostic.

1 - Diagnostic d'un déréglage de suspension

Le diagnostic peut être effectué en constatant l'une des conséquences d'un déréglage de suspension :

- contrôle de la géométrie (tablier, câbles porteurs, verticalité des suspentes et pylônes) ;
- mesure de la tension des torons élémentaires constituant les câbles porteurs et celle des suspentes. (Dans les ponts suspendus anciens à tablier léger et suspentes très rapprochées, il était usuel de « tester la tension des suspentes » en les secouant en passant à pied sur le tablier. Si cette méthode apparaît peu scientifique, elle a servi pendant longtemps à décider des réglages de suspentes pour ce type d'ouvrage.)

2 - Méthodes de diagnostic spécifiques

2.1 - Auscultation électromagnétique

L'état des câbles peut être ausculté par différentes méthode non-destructives.

2.1.1 - La mesure du taux d'oxydation

Cette méthode permet d'évaluer le niveau de corrosion généralisée d'un câble. Elle ne permet pas de détecter les formes de corrosion localisées comme la corrosion fissurante sous tension.

La mesure consiste à faire circuler un solénoïde, couramment appelé « bobine », le long du câble afin de mesurer l'inductance du système câble-bobine. Des abaques permettent ensuite d'estimer le niveau de corrosion généralisée du câble. Cependant l'évaluation quantitative de ce niveau de corrosion nécessite la connaissance de l'inductance du câble à l'état sain, c'est-à-dire dans son état d'origine. Cette valeur étant rarement disponible pour les ouvrages anciens, la méthode est plus généralement utilisée de manière qualitative et comparative comme un outil de suivi de l'évolution de la corrosion généralisée des câbles. Elle est en cela un bon indicateur de l'évolution de la corrosion à l'intérieur du câble.

2.1.2 - La détection de défauts

Il existe plusieurs méthodes permettant de détecter les défauts et les ruptures de fils éventuels à l'intérieur des câbles. La plus courante consiste à faire circuler un système magnétisant et une bobine inductrice le long du câble et de rechercher les modifications des champs magnétiques induits par des ruptures de fils ou des variations de section. On peut ainsi comptabiliser le nombre de défauts et les réductions de section le long du câble.

La méthode fait appel à des appareils pouvant être relativement volumineux et difficiles à manier selon les diamètres des câbles auscultés. Il est donc nécessaire de bien analyser la configuration géométrique du câble afin d'utiliser un appareil adapté. Dans le cas où les appareils courants ne permettent pas l'auscultation, la fabrication d'appareils spécifiques adaptés est envisageable, le coût d'un tel appareil dépendant des adaptations nécessaires.

Dans certains cas, la gammagraphie peut aussi permettre de lever des doutes sur la présence d'un défaut interne. Cette technique est cependant lourde et complexe à mettre en œuvre sur les câbles et contrairement aux autres méthodes ne permet d'agir que sur une très petite portion de câble.

Le principal reproche qui peut être fait à ces méthodes non-destructives est de ne pas permettre l'auscultation de points singuliers tels que les culots ou les parties sur selles ou sous colliers. La problématique de l'auscultation non-destructive interne des culots reste encore cantonnée aux études en laboratoire.

Lors d'une auscultation des câbles, il est envisageable de démonter un ou plusieurs colliers afin d'avoir une information précise sur ces points singuliers. Ces opérations doivent toutefois être préparées et effectuées avec précaution.

2.2 - Mesure de tension dans des câbles ou dans des barres

2.2.1 - Méthode de pesage « effort déformation »

La méthode consiste à équiper une barre d'un vérin dont le circuit hydraulique est muni d'un capteur de pression. Le système est complété par un capteur de déplacement ce qui permet de tracer la courbe effort/déformation. Le principe consiste à détecter le changement de rigidité correspondant au décollement de l'écrou. On effectue une mesure dans chaque sens de déplacement afin de pouvoir effectuer les corrections correspondant aux frottements.

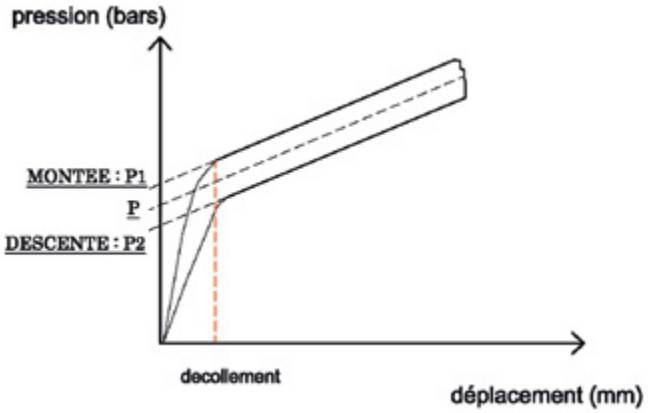


Figure 115 : Courbe Effort/Déplacement

Cette méthode doit être mise en œuvre avec certaines précautions :

- le système de transfert de charges doit minimiser les frottements et les flexions ;
- la pompe (ou ses équipements annexes) doit permettre de fournir des débits très faibles afin de pouvoir caractériser le décollement, et donc le changement de rigidité du système.

2.2.2 - Méthode vibratoire

L'évaluation de la tension des câbles (ou des barres) s'effectue par l'identification de leur réponse en fréquence et l'application du modèle de la corde vibrante en fonction de la longueur et la tension des éléments. D'autres modèles dynamiques peuvent être utilisés : poutre rotulée, poutre encastrée, etc.

La méthode utilisée est la LPC n° 35 « Mesure de la tension des câbles par vibration » avec son addendum.

Méthode : principe de la mesure

➥ **Module de rigidité négligeable : Modèle corde vibrante**

La fréquence de vibration du câble est liée à sa tension. En assimilant le câble à une corde vibrante, la relation entre ces deux grandeurs est :

$$f_n = \frac{n}{2l} \times \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Avec

- f : Fréquence (Hz)
- l : longueur libre (m)
- T : Tension (N)

- μ : Masse linéique (kg/m)
- n : Ordre du mode de vibratoire
- la tension est obtenue par : $T = 4 \times l^2 \times \mathrm{f}^2 \times \mu$ en prenant la fréquence du mode fondamental (n=1)
- une corde vibrante a un module de rigidité nul (EI). Pour qu'une suspente réponde au modèle corde vibrante, Il faut que son module EI soit faible, que le seul rôle joué par les ancrages soit d'assurer un point fixe (afin de s'affranchir des conditions limites système articulé ou encastré). Ce modèle est valable pour des suspentes ayant une longueur libre suffisamment importante.

Le test de validité de modèle est :

- identification des fréquences propres issues d'un traitement de type FFT (Fast Fourrier Transform) correspondantes aux modes de vibrations successifs ;
- tracé de la courbe $f_n = f(n)$;
- détermination de la valeur n_0 pour laquelle la relation cesse d'être une droite ;
- si $n_0 > 7$, la relation de la corde vibrante peut être appliquée.

➥ Module de rigidité non négligeable

- lorsque que le module (EI) devient non négligeable, que les longueurs de suspentes sont trop courtes pour utiliser le modèle de corde vibrante, celles-ci ont un comportement plus proche d'une barre tendue ;
- il convient d'intégrer le module EI dans la modélisation ;
- la note « Note sur méthode d'essai n°35 : Détermination de la tension d'un câble à partir des mesures de fréquences » - 2003 - EB/CC (LCPC), permet d'évaluer la tension d'une suspente en prenant en compte son module de rigidité ;
- cette méthode concerne les cas de câbles bi-encastrés, bi-rotulés et encastrés-rotulés ;
- le calcul de deux paramètres sans dimension permet de déterminer le critère d'application de chacun des modèles (seuil de validité) ainsi que leurs choix.

Dispositif d'acquisition

Le système d'acquisition se compose de :

- un micro-ordinateur ;
- un boîtier d'acquisition permettant l'acquisition synchrone de 4 voies de mesure jusqu'à 100 kHz ;
- une application dédiée ;
- quatre accéléromètres uni axiaux de type IEPE (0,5-6 Khz/ +/- 5 g) ;
- un point de mesure comprend deux accéléromètres positionnés à 90° ;
- deux points de mesure sont positionnés sur une suspente ou un câble.

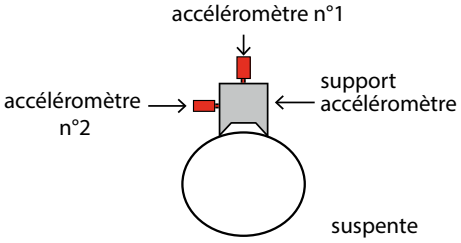


Figure 116 : Principe de pose d'accéléromètres sur un câble

Contraintes et limites de la méthode

Cette méthode nécessite la connaissance précise des éléments suivants :

- caractéristique mécanique du câble ou de la barre : A, I, E (équivalent) ;
- masse linéique de l'élément (y compris complexe anticorrosion) ;
- longueur de l'élément cohérente avec les conditions d'extrémité (rotule ou encastrement).

La méthode peut devenir d'un emploi délicat ou impossible quand les éléments sont trop courts et/ou quand les vibrations des attaches d'extrémité perturbent trop le comportement dynamique de l'élément.

2.2.3 - Méthode ultra-sonore

Cette méthode de mesure de tension dans des barres et boulons consiste à mesurer le « temps de vol » c'est-à-dire le temps de parcours du train d'ondes entre l'émission et la réception d'un train d'ondes ultra-sonores qui est réfléchi à l'extrémité de la barre ou de la vis.

L'effort de traction entre les deux écrous a différents effets qui sont pris en compte pour traduire le temps de vol en effort.

- une augmentation de l'effort de traction :
  - augmente la longueur de la tige (augmentation du temps de vol),
  - diminue la vitesse de propagation des ondes (augmentation du temps de vol) ;
- l'augmentation de la température ralentit la propagation des ondes ultra-sonores (la longueur ultrasonique augmente plus vite que la longueur physique) ;
- la mesure de traction nécessite de connaître une mesure de la longueur ultrasonique de la barre à contrainte nulle (toutes les barres sont numérotées et mesurées).

L'appareil a été étalonné en laboratoire mais les mesures effectuées sur ouvrage sont plus difficiles à exploiter probablement à cause des qualités de contact et des flexions parasites (mesures impossibles sur certaines barres, mesures aberrantes, etc.).

Il paraît nécessaire de recouper les mesures effectuées sur ouvrage avec une autre méthode (méthode effort déformation par exemple).

Figure 117 : Appareil de mesure US de type Boltmike III

2.3 - Ouverture de faisceaux pour examen visuel des câbles élémentaires internes

Lorsque des doutes importants existent sur l'état d'un faisceau de câbles, son ouverture en vue de visualiser l'état interne des contacts et des torons élémentaires peut constituer une méthode de diagnostic intéressante.

Figure 118 : Ouverture d'un faisceau par introduction de coins en bois

Figure 119 : Ouverture d'un faisceau à l'aide de pinces hydrauliques

Lorsque la décision d'ouvrir un faisceau est prise, les fils rompus sont libérés et se déroulent autour des torons, ce qui peut rendre difficile l'opération de fermeture du faisceau. Généralement, les torons internes sont oxydés plus ou moins fortement au bas de la parabole (spécialement au niveau du nœud central, s'il existe, et que les dispositifs d'écoulement d'eau sont bouchés).

L'observation des câbles peut être faite après détente d'une suspente, ouverture du collier et dépose du collier (ou glissement du collier sur le faisceau). Ceci demande des moyens de manutention adaptés et la fermeture d'au moins une voie de circulation.

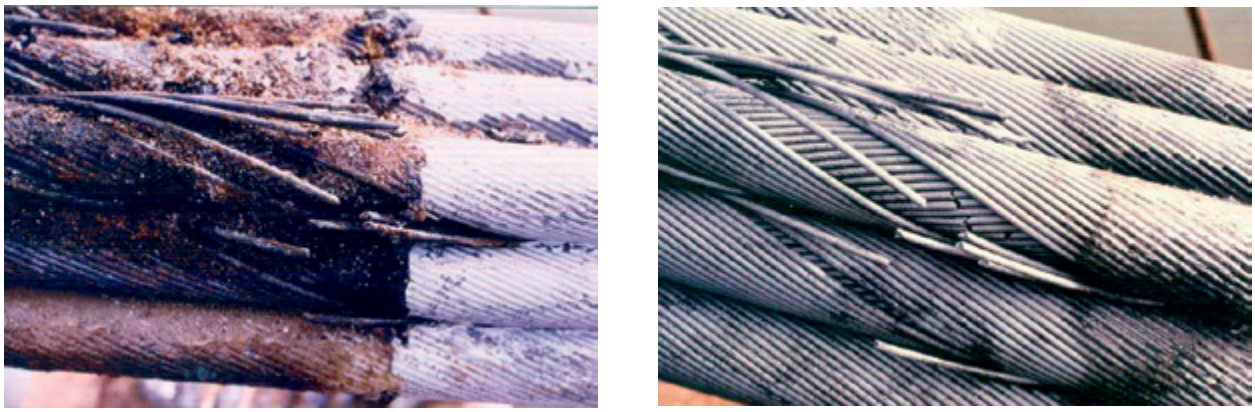


Figure 120 : Le décapage permet de mieux visualiser les dégradations mais impose des précautions particulières pour le recueil des produits de décapage et la protection des opérateurs. On soupçonne l'introduction d'abrasif entre les fils d'accélérer les phénomènes de fretting

Le décapage permet de mieux visualiser les dégradations mais impose des précautions particulières pour le recueil des produits de décapage et la protection des opérateurs. On soupçonne l'introduction d'abrasif entre les fils d'accélérer les phénomènes de fretting.

Pour refermer les colliers, il peut être nécessaire de coller (ou braser) les fils rompus (ou simplement de les couper) mais surtout, il est indispensable de refaire la protection (système de peinture + masticage) et, si possible, de mettre en place une feuille de zinc intermédiaire entre le faisceau et les mordaches du collier.

3 - Réparations

3.1 - Remplacement de culots

3.1.1 - Objectif d'un remplacement de culots

Le remplacement des culots d'ancrage est nécessaire dans le cas de fissures ou d'utilisation d'un matériau fragile pour la constitution des culots. Ce remplacement peut aussi être envisagé en cas d'endommagement du câble en sortie de culot ou dans le cas d'une suspicion de défaut de culottage.

3.1.2 - Cinématique d'un remplacement de culots

L'enchaînement des tâches pour le remplacement d'un culot est le suivant :

1. Reprise des efforts du câble élémentaire par une mordache.
2. Transfert de la charge du câble élémentaire à l'ancrage (ou éventuellement aux autres câbles élémentaires) via la mordache. Cette opération nécessite l'utilisation d'un dispositif de transfert de charges.
3. Démontage de l'ancien culot et tronçonnage du câble.
4. Reculottage : le reculottage impose d'épanouir le câble élémentaire puis de couler dans la douille sur l'épanouissement des fils un métal en fusion (actuellement du zinc pur). Le culot doit théoriquement être placé verticalement, le rayon de courbure minimal du câble élémentaire est de 30 diamètres et l'axe du câble doit sortir dans une position parfaitement rectiligne dans l'axe du culot (longueur droite de l'ordre du mètre). Ces dispositions géométriques sont très contraignantes et imposent un échafaudage d'assez grande hauteur sur lequel il faut manipuler du zinc en fusion et procéder à des opérations délicates.
5. Transfert de charges sur les ancrages après culottage et démontage des organes de transfert.

L'application stricte de ces contraintes géométriques impose, dans le cas d'un culot sur un câble de 60 mm situé à 1 m du sol, un reculottage à près de 9 m de hauteur. Il est toutefois possible de réduire la hauteur de travail en conservant une inclinaison au culot et en utilisant un coffrage pour le remplir incliné.

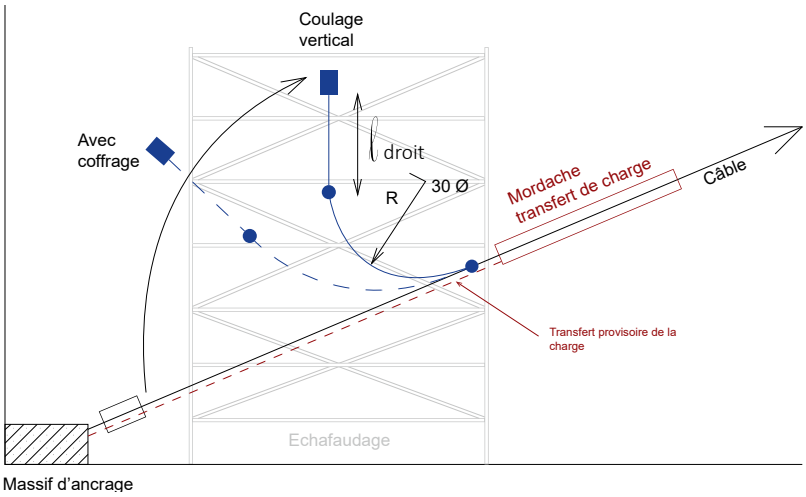


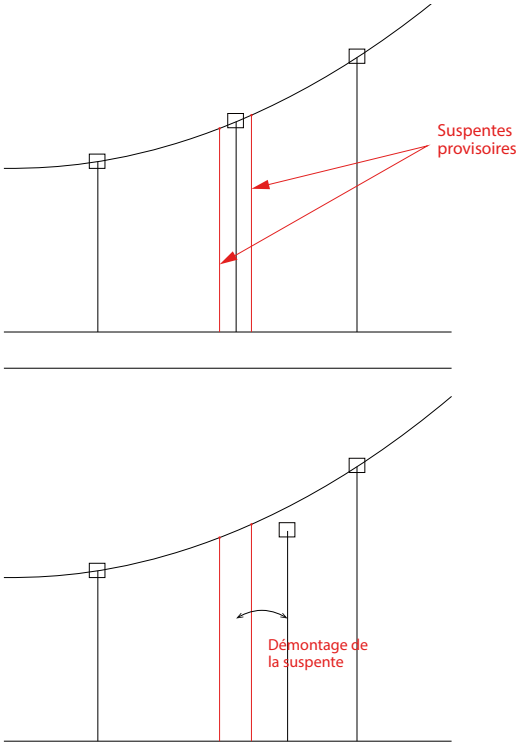
Figure 121 : Principe de changement de culots sur un câble de retenue

3.2 - Changement de suspentes

Le transfert de charges peut imposer le remplacement des suspentes par des suspentes provisoires dont la géométrie des attaches est compatible avec les mouvements de câbles. Il peut aussi être nécessaire de changer une suspente accidentée isolée. Les suspentes sont normalement dimensionnées pour que l'une quelconque d'entre elles puisse être démontée voire se rompre sans provoquer de phénomène de rupture en chaîne.

Deux méthodes peuvent être alors utilisées :

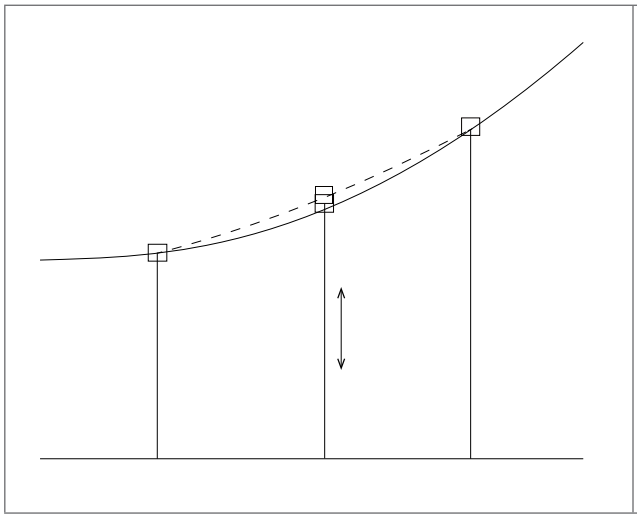
1. Utilisation de suspentes provisoires



On utilise des suspentes provisoires et deux transferts de charges. Cette opération ne perturbe pas l'état d'équilibre du câble et ne modifie ni les sollicitations des suspentes voisines, ni celles du tablier. Elle est donc souvent préférée.

Figure 122 : Remplacement d'une suspente avec des suspentes provisoires

2. Détension, replacement et remise en tension



Cette manière d'opérer augmente la tension des suspentes voisines d'environ 50 %, modifie l'équilibre du câble et les sollicitations dans le tablier. Cette méthode ne peut être utilisée que si l'on est certain de la résistance suffisante des suspentes voisines. Cette opération peut déclencher une rupture en chaine si l'endommagement d'une suspente voisine n'a pas été détecté.

Figure 123 : Remplacement d'une suspente sans suspente provisoire

3.3 - Changement de suspension

La question du changement de suspension se pose principalement quand l'état de dégradation des câbles conduit à douter du niveau de sécurité de la structure. Le changement de suspension est une opération très délicate. La conception doit être effectuée par un bureau d'études ayant des références dans des opérations complexes. Les travaux de ce type ne peuvent être confiés qu'à des entreprises dont les références ont été examinées avec soin.

Le lecteur intéressé trouvera des informations plus détaillées sur les changements de suspension dans l'annexe 12.

3.3.1 - Les principes

Le changement de suspension consiste à mettre en place la nouvelle suspension, y transférer le poids de la partie suspendue (le tablier) et déposer l'ancienne suspension. Cette opération peut éventuellement se faire en supportant temporairement le tablier à l'aide d'une suspension provisoire ou de palées.

3.3.2 - Les questions à se poser

Un projet de remplacement de suspension doit répondre de manière satisfaisante à un ensemble de problèmes parfois complexes et interconnectés :

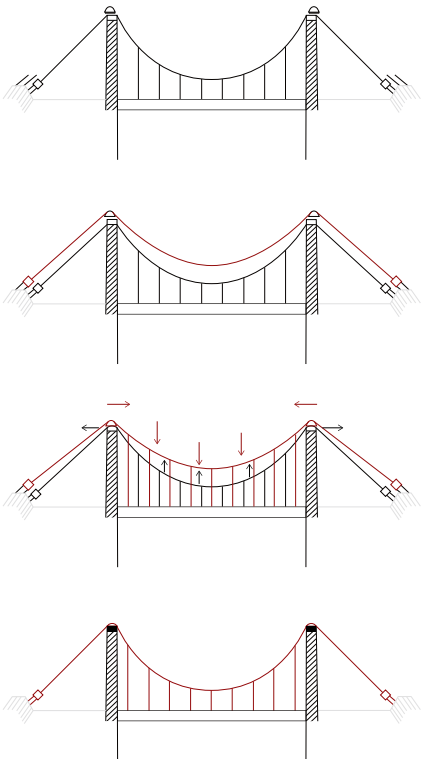
1. Où et comment ancrer les différentes familles de câbles porteurs (câbles anciens, suspension provisoire éventuelle et câbles futurs) ?
2. Où et comment appuyer ces différentes familles de câbles (câbles anciens, suspension provisoire éventuelle et câbles futurs) ?
3. Comment concevoir des géométries de suspension et/ou de transferts de charges assurant l'absence de conflit du début de l'opération à la fin du démontage des câbles anciens (les transferts de charges induisent des déplacements longitudinaux et verticaux antagonistes des différentes familles de câbles) ?
4. Comment effectuer les transferts de charges en conservant des déformées et sollicitations admissibles par tous les éléments de la structure ?
5. L'utilisation de palées est-elle possible ?

3.3.3 - Différentes familles de solutions

1. Changement de suspension avec transfert direct de l'ancienne suspension vers la nouvelle (1 transfert de charges).
2. Changement de suspension avec utilisation d'une suspension provisoire (2 transferts de charges).
3. Changement de suspension avec utilisation de palées provisoires (2 transferts de charges).

3.3.4 - Exemple d'un changement de suspension sur une travée suspendue

- Changement de suspension avec transfert direct de l'ancienne suspension vers la nouvelle (1 transfert de charges).



Préparation des selles et des ancrages de la nouvelle suspension.

Lancement des nouveaux câbles, réglage des positions des selles des ancrages et de la géométrie du câble.

Transfert du poids du tablier de l'ancienne suspension vers la nouvelle. On raccourcît les nouvelles suspentes, la nouvelle suspension descend et les nouvelles selles se rapprochent alors que l'ancien câble remonte. L'opération se termine par la détension des anciennes suspentes et peut être complétée par des réglages aux ancrages.

Démontage de l'ancienne suspension et réglage final.

Figure 124 : Exemple de principe de remplacement d'un câble porteur

3.4 - Réparation des poutres de rigidité

3.4.1 - Causes du déversement des poutres de rigidité

Les sollicitations dans les poutres de rigidité dépendent principalement de l'inertie des poutres et du rapport entre les charges mobiles et les charges variables. Il convient d'insister sur le fonctionnement particulier de ces poutres qui, si l'on raisonne de manière simplifiée, subissent le chargement de déformation consécutif de l'adaptation géométrique du câble porteur au passage des charges mobiles.

Le flambement, ou l'amorce de flambement, de la membrure supérieure dans le cas de poutres de rigidité latérales (ayant parfois aussi la fonction de barrière) est la conséquence d'un effort normal trop important dans la membrure supérieure associé à un maintien transversal insuffisant.

Si l'on écarte le cas où le problème peut être réglé par un réglage de suspension (qui sera aussi nécessaire si l'on adapte la poutre), la logique habituelle consisterait à renforcer la membrure supérieure jusqu'à ce que le moment de flexion maximal conduise à une contrainte compatible avec les problèmes de déversement. Cette approche est erronée dans le cas d'une poutre de rigidité. Un tel renforcement conduirait à une rigidification de la poutre et donc à une augmentation des moments de flexion.

3.4.2 - Adaptation des poutres de rigidité

Il convient d'augmenter la rigidité transversale des membrures ainsi que la rigidité de leurs dispositifs de maintien dans le plan horizontal (portiques montants / pièces de pont dans les cas courants). Cette rigidification doit s'effectuer en minimisant l'augmentation de rigidité dans le plan vertical. La variation du moment d'inertie étant inévitable, l'ouvrage doit être recalculé (calculs non linéaires) afin de valider les options envisagées pour le renforcement (les sollicitations dans la poutre sont inévitablement augmentées).

Les poutres de rigidité n'étant sollicitées que par des efforts locaux lorsque l'ouvrage n'est pas circulé, les travaux de charpente métallique sont simplifiés. Par contre, si la circulation est maintenue, les sollicitations variables au passage des charges mobiles sont à considérer lors de la mise au point des méthodes. Les poutres de rigidité jouent aussi un rôle dans la résistance de l'ouvrage aux effets du vent qui doit évidemment être conservé lors des travaux.

3.5 - Les platelages

Les travaux sur platelage ne sont pas spécifiques aux ponts suspendus. Les modifications ou remplacement de platelage mettant en jeu les charges permanentes, il est conseillé d'effectuer un réglage final de la suspension. L'idéal est de travailler à poids constant. La tentation d'alléger le platelage, souvent difficile avec des platelages déjà optimisés dès l'origine, peut avoir des effets très négatifs qu'il convient d'examiner avec soin. L'allègement du tablier, s'il diminue les sollicitations dans la suspension, augmente le rapport entre les charges variables et les charges permanentes. Il accroît donc les déplacements de selles dans le cas de travées multiples mais aussi les sollicitations dans les poutres de rigidité. Toute modification des charges permanentes, même s'il s'agit d'un allègement, doit donc être validée par un recalcul non-linéaire de la structure.

Lors des travaux, la répartition des poids doit rester la plus proche possible de la situation à vide. Toute variation de la distribution longitudinale des charges provoque en effet une adaptation de la géométrie du câble porteur et un chargement de déformation du tablier. Si le phasage de travaux conduit temporairement à une mauvaise répartition longitudinale des charges, les phases correspondantes doivent être testées avec un calcul non linéaire.

3.6 - Massifs d'ancrage

Les massifs d'ancrage ont toujours constitué un poste important du coût d'un pont suspendu. Ces ouvrages étaient souvent conçus et dimensionnés par des charpentiers métalliques qui les examinaient parfois sommairement. La conception et le dimensionnement global des ancrages sont déterminés par des critères géotechniques. Les coefficients de sécurité concernant les fondations ne se sont figés qu'assez récemment. Tout ceci explique que lors d'un recalcul moderne, on trouve régulièrement sur les ancrages des niveaux de sécurité très en deçà de ceux exigés aujourd'hui. Il n'en demeure pas moins que l'on ne rapporte pas d'accident lié à une défaillance de massif d'ancrage même si de faibles mouvements ont déjà été constatés.

3.6.1 - La stabilité externe

Le fascicule 62 titre V et maintenant l'Eurocode 7 donnent des prescriptions précises pour justifier la stabilité externe de ce type d'ouvrage. Dans les anciennes notes de calculs, on peut parfois noter l'absence de prise en compte de l'allègement du massif par déjaugeage lors des crues et une prise en compte optimiste de la butée frontale qui exige des déplacements significatifs pour être mobilisée. La pertinence des paramètres de la justification doit donc être examinée avec soin.

Dans le cas de réhabilitation d'ouvrage, le problème quand il existe est de redonner un niveau de sécurité de type réglementaire aux massifs.

Il est possible d'utiliser des tirants actifs ancrés dans le sol, ce qui augmente la contrainte de contact entre le massif et le sol support et permet ainsi de mobiliser un frottement plus important. L'effort de traction dans ces tirants doit être régulièrement pesé et il est prudent de réserver des emplacements de secours afin de rajouter des tirants complémentaires en cas de diminution de l'effort de précontrainte.

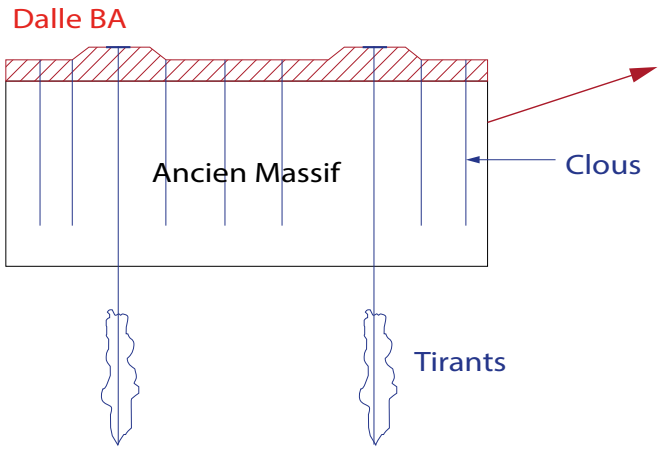


Figure 125 : Principe de l'utilisation de tirants

Des micropieux peuvent aussi être utilisés. Leur efficacité à l'effort normal conduit à les orienter dans la direction des résultantes des efforts concernés. Les micropieux sont moins sensibles au problème de corrosion que les tirants (sections d'acier massives et soumises à des contraintes modérées) mais ils nécessitent un déplacement du massif pour mobiliser leur capacité.

3.6.2 - Les ancrages des câbles

Les ancrages nécessaires à la fixation des culots des câbles porteurs au massif se situaient initialement au fond de puits et de galeries situés à l'arrière des massifs. L'effort d'ancrage se diffusait donc naturellement dans l'ensemble du massif. Cette position était toutefois très défavorable vis-à-vis des problèmes de corrosion. Sur de nombreux ouvrages, on a depuis sorti les culots à l'extérieur en faisant transiter l'effort avec des barres d'ancrage. Les puits et galeries ont alors le plus souvent été comblés avec du béton. Le remplacement de ces barres, quand elles sont fragiles, s'avère maintenant problématique.

Dans le cas de remplacement de suspension, il peut être nécessaire de rajouter des ancrages pour des câbles et suspension provisoires et/ou pour la nouvelle suspension.

Le problème consiste à diffuser l'effort d'ancrage des câbles dans le massif (en maçonnerie dans les ouvrages anciens) et à le faire transiter jusqu'au sol de fondation sans risque de provoquer des ruptures internes au massif.

La solution mécaniquement la plus satisfaisante est de s'appuyer à l'arrière du massif avec une poutre d'ancrage transversale. Les ancrages peuvent être décalés vers l'extérieur ou réalisés avec des barres placées dans des forages de grande longueur traversant le massif.

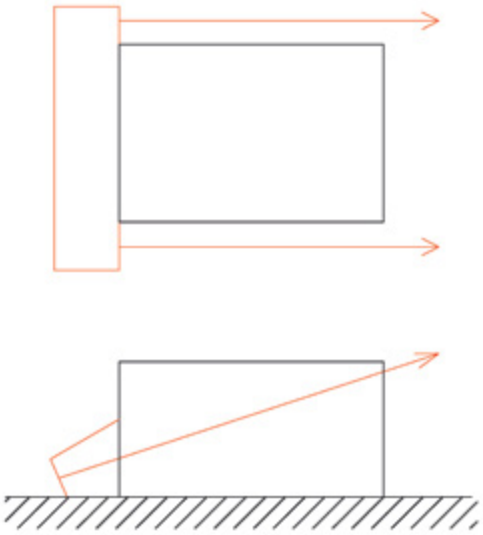


Figure 126 : Principe d'une poutre d'ancrage appuyée à l'arrière du massif

Sur le pont d'Aquitaine, les nouveaux câbles sont ancrés sur une poutre en béton précontraint de 3 500 tonnes appuyée sur les massifs d'ancrage. L'effort maximal de 6 500 tonnes apporté par chaque câble porteur est transmis aux voiles longitudinaux des massifs initiaux par l'intermédiaire d'une articulation Freyssinet verticale assurant l'appui horizontal de la poutre d'ancrage sur le massif poids.

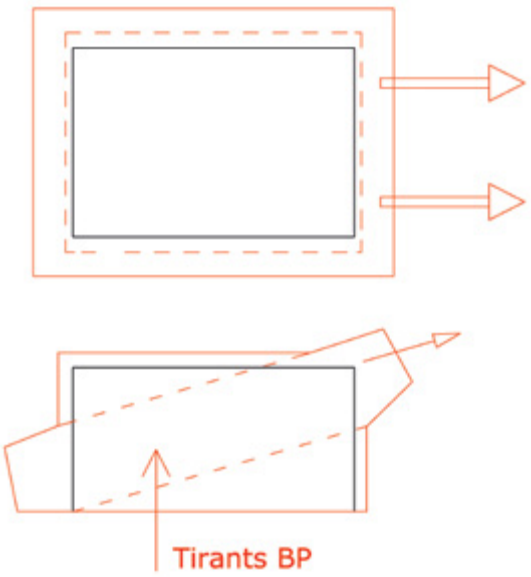


Figure 127 : Exemple de transfert de la charge à l'arrière du massif utilisant des tirants précontraints

La figure n°127 illustre une variante utilisant une poutre s'appuyant à l'arrière du massif et des tirants de béton précontraint de transfert et une poutre d'ancrage avant. Cette variante permet de ne pas passer les câbles (ou leurs barres d'ancrage) à l'extérieur du massif.

3.7 - Réparation ou remplacement des selles et sellettes

Les remplacements ou aménagements des selles d'appui ou sellettes de déviation sont le plus souvent dus au blocage longitudinal de celles-ci. On peut cependant trouver des géométries inadaptées dès la construction initiale avec des bords de selles agressifs vis-à-vis du câble. Les déplacements des points d'appui du câble sont indispensables à un fonctionnement convenable de la structure. S'ils sont empêchés localement, ils se produiront inévitablement de manière différente (fissures de flexion et/ou d'effort tranchant sur des pilettes courtes, mise en flexion de pylônes, etc.).

Les fonctions de butée au vent et de limitation des déplacements longitudinaux doivent être impérativement analysées et conservées (l'échappement d'un de ces organes entraîne la ruine de l'ouvrage).

Les solutions utilisées pour libérer les déplacements sont :

- remplacement du dispositif à rouleaux par une surface de glissement téflon-inox ;
- remplacement des rouleaux par des rouleaux tubulaires en inox et changement des tôles de roulement, la piste de déplacement étant protégée par des jupes en caoutchouc ;
- utilisation d'un appareil d'appui en caoutchouc fretté. Cette option est toutefois réservée aux charges modestes et aux petits déplacements.

Ces adaptations ou remplacements sont le plus souvent effectués à l'occasion d'un remplacement de la suspension car, à l'exception d'ouvrages modestes très légers, il est pratiquement impossible d'effectuer des interventions lourdes sur les selles sans déposer les câbles portés.

Bibliographie

- « Les ponts suspendus en France » (Sétra/LCPC) - 1989
- « Mémoire sur les ponts suspendus » - M. Navier - 1830
- « Des ponts en fil de fer » - M. Seguin - 1824
- « A manual of applied mechanics » - W.J.M. Rankine - 1858
- « Ponts suspendus » - G. Leinekugel Le Coq - Encyclopédie scientifique 1911 tomes 1 et 2 - 1911
- « Les ponts suspendus (calculs, fabrication, montage) » - Revue Acier - 2e trimestre 1937
- « Analyse et calcul des structures » - A. Samikian - 1998
- « Mécanique de l'ingénieur - Statique » - M. Kraige - 1993
- « Cours de ponts métalliques » - M. Grelot (École nationale des ponts et chaussées) 1re et 2e parties - 1956
- « Résistance des matériaux » - J. Courbon - Tomes 1 et 2 - 1971
- « Bulletin OTUA Ponts métalliques 2000 n°20 Spécial Millénium - les ponts suspendus (B. Bouvy, P. Lecroq) » - 2000
- « Bulletin OTUA Ponts métalliques 2002 n°21 - Les ponts à haubans, l'efficacité technique alliée à l'élégance architecturale (M. Virlogeux) - Les ponts suspendus : passé, présent, futur (S. Ewert, B. Bouvy) » - 2002
- « A practical treatise on Suspension Bridges - Their design construction and erection » - D.P. Steinman - 1886
- « Theory of Arches and Suspension Bridges » - J. Melan, D.B. Steinman - 1913
- « Ponts haubanés » - R. Walther - 1985
- « Structural steel designer's handbook » - Roger L. Brockenbrough - F. S. Merritt - Section 15 : Câble suspended bridges (W. Polony Jr) - 1972
- « Bridges Elémentary Treatise on their construction and History » - F. Jenkin
- « A history of the development of the suspension bridge » - H.A. Mann
- « Connaissance des ouvrages d'art : Les ponts suspendus » n°3 et 4 - 1988-1989
- « NCHRP Report 534 - Guidelines for inspection and strength evaluation of suspension bridges. Parallel wire câbles » - 2004
- « Bridge engineering handbook Substructure design » - Wai Fah Chen Lian Duan - 2003
- « Câble supported bridges concept and design » - N. J. Gimsing, C. T. Georgakis - 2011
- « Stress Ribbon and câble-supported pedestrian Bridges » - J. Strasky - 2005
- « Bridge Management » - B. YANEV - John Wiley & Sons - 2007
- « Microstructure et propriétés mécaniques des aciers pour câbles. Synthèse des travaux du LCPC (1970-2000) I Plasticité et endommagement » - Pierre Brevet - François Olivié - Jean Pierre Guilbaud - André Raharinaivo - 2004
- « Microstructure et propriétés mécaniques des aciers pour câbles. Synthèse des travaux du LCPC (1970-2000) II Ténacité, fissuration sous contrainte et fatigue » - Pierre Brevet - André Raharinaivo - Dominique Siegert - 2004
- « Fatigue des câbles de haubannage. Organisation et principaux résultats du programme de recherche dirigé par le LCPC. » - Jean-Paul Gourmelon - 2003
- « Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées : Guide technique : Entretien de la protection anticorrosion des ouvrages métalliques » - 2005

Notes :

Notes :

Notes :

© 2021 - Cerema

Cerema - Climat & territoires de demain

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre de ressources et d'expertise, il a pour vocation de produire et de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, services de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que se soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination et suivi d'édition › Cerema Infrastructures de transport et matériaux, Département de la valorisation technique, Pôle édition multimédia.

Mise en page › **Drapeau Graphic - Parc Éco 85 - 27 impasse Louis-Marie Barbarit - 85000 La Roche-sur-Yon**

Crédits photos › **© Université Gustave Eiffel, © Cerema**, **© Services Techniques du département du Lot**

ISBN : **978-2-37180-510-1**
ISSN : **2276-0164**
Téléchargement gratuit

Éditions du Cerema
Cité des mobilités
25 avenue François Mitterrand
CS 92 803
69674 Bron Cedex

Pour commander nos ouvrages › **www.cerema.fr**
Pour toute correspondance › **bventes@cerema.fr**

www.cerema.fr › Nos publications

La collection « Références » du Cerema

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art

Fascicule 34-1 | Ponts suspendus

Le présent document est un fascicule d'accompagnement de l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA) de 2010.
Il annule et remplace la partie Ponts suspendus de l'ancien fascicule 34 de mars 1986 de l'ITSEOA.
Il traite de la surveillance, de l'évaluation, de l'entretien et de la réparation des ponts suspendus.
Il constitue un guide destiné principalement aux personnels techniques des organismes chargés de la surveillance (visiteurs et inspecteurs d'ouvrage), des bureaux d'études et laboratoires spécialisés et aux gestionnaires de réseau d'infrastructures de transport dans les services de l'État, les collectivités territoriales et les autres organismes.

Sur le même thème

L'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEOA) de 2010 est constituée du fascicule 0 - « Dispositions générales applicables à tous les ouvrages » et des 3 fascicules d'application suivants qui lui sont annexés :

- fascicule 1 - « Dossier d'ouvrage » ;
- fascicule 2 - « Généralités sur la surveillance » ;
- fascicule 3 - « Auscultation, surveillance renforcée, haute surveillance, mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde ».

Les autres fascicules, qui constituaient la seconde partie de la précédente version de l'ITSEOA (1979) et qui ne font plus partie intégrante de l'ITSEOA de 2010, ont désormais un statut de guide technique.

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Téléchargement gratuit
ISSN : 2276-0164
ISBN : 978-2-37180-510-1

9 782371 805101

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - www.cerema.fr
Infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris - 77171 Sourdun - Tél. +33 (0)1 60 52 31 31
Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30