

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

Fascicule 34-1 | Ponts suspendus | Annexes



Mars 2021

Guide technique

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

Fascicule 34-1 | Ponts suspendus | Annexes

Sommaire

Préambule.....	5
Annexe 1 - Ponts et passerelles suspendus français.....	7
Annexe 2 - Méthodes de construction du tablier.....	21
Annexe 3 - Modes de fonctionnement	24
Cas du pont suspendu à trois travées	24
Travées multiples, pylônes massifs et câbles de tête.....	26
Annexe 4 - Piles, culées, massifs d'ancrage.....	29
Les massifs et chambres d'ancrage	29
Annexe 5 - Suspension	32
Les câbles.....	32
Selles d'appui, sellettes de déviation et colliers d'épanouissement	47
Les suspentes.....	56
Ancrages et organes d'attache des câbles porteurs et suspentes en câbles.....	61
Annexe 6 - Tablier.....	65
Les tabliers des ponts anciens de moyenne portée	65
Différents types de poutres de rigidité	66
Les tabliers les plus anciens	68
Pièces de pont et longerons	70
Les différents types de platelage	70
Les câbles « au vent »	74
Stabilité aéroélastique des ponts modernes de grande portée	75
Deux exemples récents : le pont du Chavanon et le grand pont sur la Loire	78
Annexe 7 - Appareils d'appui.....	80
Rôles des appareils d'appui.....	80
Choix d'un système d'appareils d'appui	84
Schéma mécanique d'ensemble.....	85
Annexe 8 - Protection anticorrosion des suspensions	89
Eléments généraux.....	89
Préconisations du fascicule 56 du CCTG de février 1986.....	89
Définition du système anticorrosion	90
Exemple de protection anticorrosion d'un câble neuf	91
Points singuliers/selles et colliers	91
Evolution de la réglementation.....	92
Nouvelles techniques.....	93

Annexe 9 - Déshumidification des câbles	94
Historique	94
Principe d'action de la déshumidification	94
Composition d'une installation de déshumidification	96
Annexe 10 - Mécanisme de dégradation des câbles	101
Méthodes de fabrication des fils	101
Défauts possibles sur le fil tréfilé	102
Défauts possibles sur les aciers trempés	102
Fabrication des torons élémentaires	102
Mécanismes de dégradation des câbles	103
Annexe 11 - Rupture fragile des aciers	112
Lien entre nature des aciers et rupture fragile	112
Existence d'une température de transition ductile-fragile	113
Effet d'entaille	113
Influence des paramètres métallurgiques	114
Influence de la taille de grain ferritique	114
Influence de la microstructure perlitique	115
Influence des éléments d'addition en solution solide dans la ferrite	115
Influence de la teneur en carbone	115
Eléments de mécanique de la rupture	115
Critères mis au point en 1987 pour permettre la prise de mesures adaptées par temps froid	119
Commentaires	121
Annexe 12 - Changement de la suspension	122
Principes	122
Questions à se poser	122
Utilisation de palées	122
Changement de suspension sans palées	123
Annexe 13 - Nacelles de visite	133
Analyse de risques liée aux passerelles	134

Préambule

Ces annexes, structurées en 13 parties, complètent le fascicule n° 34.1 de l'ITSEOA consacré aux ponts suspendus sur un certain nombre de sujets.

Dans un souci de compréhension de ces annexes, quelques textes qui figurent déjà dans le document principal ont été remis dans ce document.

Annexe 1 - Ponts et passerelles suspendus français

Le tableau qui suit donne la liste, département par département, des ponts et passerelles suspendus français, qu'ils soient en service ou non. Tous les ouvrages sont des ponts sauf ceux comportant la mention passerelle dans la première colonne. L'expression Classé MH désigne les ouvrages classés monuments historiques. Les départements français qui n'apparaissent pas dans le tableau ne comportent ni pont ni passerelle suspendu.

Pont	Gestionnaire	Longueur	Statut	Franchissement
Ain - 01				
Beauregard	CD 01	159,50 m	En service Classé MH	La Saône
Groslée	CD 01	176,80 m	En service	Le Rhône
Montmerle	CD 01	178 m	En service	La Saône
Seyssel (vierge noire)	CD 01	160 m	En service	Le Rhône
Yenne-Nattages	CD 01	104 m	En service	Le Rhône
Alpes de Haute-Provence - 04				
Archidiacre (Ventérol)	CD 04	53,6 m	Démonté	La Durance
Fonbéton	CD 04	71 m	Démonté	La Durance
Manosque	CD 04	200 m	En service	La Durance
Volonne	CD 04		Démonté	La Durance
Alpes Maritimes - 06				
Massoins (Malaussène)	CD 06	46,4 m	En service mais limité à 3 T	Le Var
La croix sur Roudoule	CD 06	34,6 m	En service	La Roudoule
Ardèche - 07				
Andance	CD 07	187 m	En service	Le Rhône
Saint Didier sous Aubenas	Etat/DIR Massif Central	101 m	Démonté et remplacé par un bipoutre	L'Ardèche

Cros de Goerand La palisse	CD 07	Travée de 90 m	En service	La Loire
La Voulte sur Rhône	CD 07	47 m+184 m+47 m	En service	Le Rhône
La Voulte (Le Livron)	CD 07	102,6 m	En service	Le petit Rhône
Saint Martin d'Ardèche	CD 07	162,4 m	En service	L'Ardèche
Passerelle Tournon		170 m	Démontée	Le Rhône
Passerelle Marc Seguin entre Tournon-sur-Rhône et Tain-l'Hermitage	CD 07	184 m	En service Classée MH	Le Rhône
Pont Gustave Toursier entre Tournon-sur-Rhône et Tain-l'Hermitage	CD 07	235,30 m	En service	Le Rhône
Viviers	CD 07	275 m	En service	Le Rhône
Passerelle de Cance	Commune de Vernosc-Les-Annonay	18 m	En service Classée MH	La Cance
Passerelle de Rochemaure	Communes riveraines de Montélimar, Ancône, Châteauneuf-du-Rhône (26), Viviers, Le-Teil et Rochemaure (07)	300 m 133 m – 138 m	En service Classée MH	Le Rhône
Ardennes - 08				
Passerelle du Mont Olympe	Ville de Charleville-Mézières	127 m	En service	La Meuse
Passerelle de Rethel	Ville de Rethel	50 m	En service	L'Aisne
Ariège - 09				
Passerelle de Ledar		50 m	En service	Le Salat
Aveyron - 12				
La Devèze	EDF	Travée de 121,20 m	En service	Le Brezons
Livinac-le-Haut	CD 12	~100 m	Démonté	Le Lot
Pont de Montézic	ERDF	Travée de 147 m	En service	La Truyère
Verdalle à Ayssènes	CD 12	102,85 m	En service	Le Tarn

Bouches-du-Rhône – 13				
Chartreuse	Particulier sur commune d'Arles	Tablier 86 m	En service	Le petit bras du grand Rhône
Fourques	CD 13	157 m	En service	Le petit Rhône
Mallemort	CD 13	300 m	Ouvrage fermé Classé MH	La Durance
Mirabeau	CD 13	155 m	Démonté	La Durance
Pertuis	CD 13	208 m	Démonté	La Durance
Rognonas	CD 13	415 m	En service	La Durance
Cantal – 15				
La Devèze	ERDF	121 m	En service	Le Brezons
Saint-Projet	ERDF	195 m	En service	La Dordogne
Tréboul	ERDF	160 m	En service	La Truyère
Vernejoux	ERDF	32 m	Démonté et remplacé par un pont en BA	La Dordogne
Charente Maritime – 17				
Tonnay-Charente	Commune de Tonnay	623 m	En service mais réservé aux piétons Classé MH	La Charente
Cher – 18				
Chevretruye	Commune de La-Chapelle-Montlinard	40 m	En service	Le canal latéral à la Loire
Nambault	Commune de La-Chapelle-Montlinard	40 m	En service mais limité à 5 T	Le canal latéral à la Loire
Corrèze – 19				
Basteyroux	Commune d'Argentat	Environ 65 m	Ouvrage fermé	La Maronne
Chambon (Eylac)	CD 19	158 m	En service	La Dordogne et le barrage Chastang
Rochers noirs (Lapleau) (Roche taillade)	CD 19	155 m	Ouvrage fermé Classé MH	La Luzège
Merle	CD 19	56 m	Démoli	La Maronne

Passerelle de la Rhune	Commune de Bort-les- Orgues	55 m	Ouvrage fermé	La Rhune
Le Chavanon	ASF	360 m	En service	Le Chavanon
Côtes-d'Armor – 22				
Lézardrieux	CD 22	160 m	En service	Le Trieux
Saint François	Commune de Tréguier	71,20 m	En service mais réservé aux piétons et aux cycles	Le Guindy
Creuse – 23				
Saint Marien	Commune de Saint-Marien	> 100 m	En service	La Tarde
Passerelle de Fresselines	Pays Dunois	40 m	En service	La petite Creuse
Dordogne – 24				
Sainte-Foy-la-Grande	CD 24 et CD 33	150 m	En service	La Dordogne
Passerelle au Lardin – Saint-Lazare	Papeterie de Condat	85 m	En service	La Vézère
Doubs – 25				
Roset-Fluans	CD 25	130 m	En service	Le Doubs
Drôme – 26				
Robinet de Donzère	CD 26	333 m	En service mais limité à 3,5 T	Le Rhône
Eymeux	CD 26	150 m	En service mais limité à 16 T	L'Isère
Gourmier	CD 26	191 m	En service mais limité à 16 T	Le canal de dérivation du Rhône
Le Teil	Etat/DIR Centre Est	317 m	En service	Le Rhône
Pierrelatte	CD 26	192,45 m 28 m – 87,65 m – 28 m	En service	Le canal Donzère Mondragon
Eure – 27				
Andelys	CD 27	150 m	En service	La Seine
Finistère – 29				
Terenez	CD 29	350 m	Démonté	L'Aulne

Gard – 30				
Moussac	CD 30		Démonté et remplacé par une passerelle	Le Gardon
Remoulins	CD 30		Démonté	Le Gardon
Roquemaure	CD 30	310 m	En service	Le Rhône
Saint Gilles	CD 30	132,5 m	Démonté et remplacé	Le petit Rhône
Brignon	CD 30		Démonté	Le Gardon
Haute-Garonne – 31				
Bessières	CD 31	150 m	En service	Le Tarn
Boussens	Usine LAFARGE	180 m	Ouvrage fermé	La Garonne
Buzet	CD 31	150 m	En service	Le Tarn
Capens	CD 31	159 m	Démonté et remplacé	La Garonne
Fourc	CD 31	52 m	En service	La Garonne
Layrac	CD 31	235 m	Démonté et remplacé	Le Tarn
Mirepoix	CD 31	155 m	Effondré en 2019	Le Tarn
Roquefort	CD 31	68 m	En service	Le Salat
Villemur	CD 31	125 m	En service	Le Tarn
Gers – 32				
Riscle	CD 32	102,5 m	En service	L'Adour
Gironde – 33				
Aquitaine	Etat/Dir Aquitaine	680 m	En service	La Garonne
Coutras	CD 33	63,25 m	Démonté	L'Isle
Gué de Sénac	CD 33	51,70 m	Démonté et remplacé	La Dronne
La Réole	CD 33	168 m	En service	La Garonne

Saint Denis de Pile	CD 33	60,5 m	En service	L'Isle
Passerelle du Grand Tressan	Etat/DIR Atlantique	69 m	En service	La RN 230
Hérault – 34				
Canet	CD 34	112,4 m	En service	L'Hérault
Cessenon	CD 34	113 m	En service	L'Orb
Gaston Doumergue Cazouls	CD 34	120 m	En service	L'Orb
Lagamas	CD 34	116 m	En service	L'Hérault
Pailhès	CD 34	101,5 m	Démonté	L'Hérault
Poujol	CD 34	130 m	En service	L'Orb
Saint Beauzille de Putois	CD 34	126,8 m	En service	L'Hérault
Passerelle Saint Thybéry	Privée		Fermé	L'Hérault
Tarassac	CD 34	101 m	En service	L'Orb
Passerelle de Saint Roch	Commune de Sérignan	100 m	En service	L'Orb
Ille-et-Vilaine – 35				
Port Saint Jean Saint Hubert	CD 35	286 m	En service	La Rance
Redon La Gicquelais (Ancien pont aux vaches)	Commune de Redon	39 m	Ouvrage fermé	Le canal de Nantes à Brest
Indre-et-Loire – 37				
Langeais	CD 37	358 m	En service	La Loire
Passerelle du fil d'Ariane	Ville de Tours	235 m	En service	Le Cher
Saint Symphorien	Ville de Tours	350 m	En service	La Loire
Isère – 38				
Brion	CD 38	150 m	En service	Les gorges de l'Ebron
Izeron	CD 38	163 m	Démonté et remplacé	L'Isère

Serrières Les Sablons	CD 38	Travée de 185 m	En service	Le canal du Rhône
Sone	CD 38	97 m	En service	L'Isère
Tencin	CD 38	162 m	En service	L'Isère
Trellins	CD 38	Travée de 146 m	Démonté	L'Isère
Veurey	CD 38		Démonté	L'Isère
Sainte Colombe	Ville de Vienne	168 m	En service mais réservé aux piétons	Le Rhône
Pont d'Oxford	CD 38	119,5 m	En service	L'Isère
Passerelle de Meylan	Ville de Grenoble	119 m	En service	L'Isère
Passerelle de Saint Laurent	Ville de Grenoble		En service	L'Isère
Passerelle du Drac	SIVOM du lac de Monteynard-Avignonet	220 m	En service	Le Drac
Passerelle de l'Ebron	SIVOM du lac de Monteynard-Avignonet	180 m	En service	L'Ebron
Passerelle des Ponants	EDF	~ 40 m	En service	La Romanche
Landes – 40				
Vimport	CD 40		Démonté et remplacé	L'Adour
Loire – 42				
Pertuiset	CD 42	106 m	Démonté	La Loire
Grand Pont sur la Loire	CD 42	312 m	En service	La Loire
Haute-Loire – 43				
Chilhac	CD 43	84 m	En service	L'Allier
Ilpize	CD 43	124 m	En service	L'Allier
Confolent	CD 43	140 m	En service Classé MH en 1990	La Loire
Lamothe	CD 43	185,6 m	Démonté et remplacé	L'Allier
Margeaix	CD 43	143 m	En service Classé MH en 1994	La Loire

Loire-Atlantique – 44				
Ancenis	CD 44	412 m	En service	La Loire
Varades	CD 44	308 m	En service	La Loire
Loiret – 45				
Bonny-sur-Loire	CD 45	361 m	En service	La Loire
Châteauneuf-sur-Loire	CD 45	276,5 m	En service	La Loire
Chatillon-sur-Loire	CD 45	353 m	En service mais limité à 3,5 T Surveillance active des basses températures	La Loire
Jargeau	CD 45	270 m	Démonté et remplacé	La Loire
Meung-sur-Loire	CD 45	271 m	En service	La Loire
Lot – 46				
Albas	CD 46	187 m	En service mais limité à 1,5 T	Le Lot
Bouzies	CD 46	142 m	En service mais limité à 10 T	Le Lot
Cajarc	CD 46	160 m	En service mais limité à 20 T	Le Lot
Carennac	CD 46	225 m	En service mais limité à 16 T	La Dordogne
Castelfranc	CD 46	170 m	En service mais limité à 16 T	Le Lot
Douelle	CD 46	167 m	En service mais limité à 16 T	Le Lot
Floirac	CD 46	160 m	En service mais limité à 10 T	La Dordogne
Gaillac	CD 46	149 m	Démonté	Le Lot
Gluges	CD 46	213 m	En service	La Dordogne
Juillac	CD 46	121 m	En service mais limité à 16 T	Le Lot
Mols	CD 46	~ 110 m	Démonté	La Dordogne
Meyronne	CD 46	Travée de 140 m	Effondré	La Dordogne

Puy-L'Evêque	CD 46		Démonté	Le Lot
Touzac	CD 46	160 m	En service mais limité à 16 T	Le Lot
Lot-et-Garonne – 47				
Agen	Ville d'Agen	263 m	En service	La Garonne
Marmande	CD 47	230 m	En service	La Garonne
Mas Agenais	CD 47	250 m	En service	La Garonne
Roussanes	CD 47	185 m	En service	Le Lot
Saint Nicolas de la Balerne	CD 47	192,5 m	Démonté et remplacé	La Garonne
Sauveterre	CD 47	197 m	En service	La Garonne
Vianne	CD 47	80 m	En service	La Baïse
Maine-et-Loire – 49				
Bouchemaine	CD 49	155 m	En service	La Maine
Chalonnnes	CD 49	109,6 m	En service	La Loire
Gennes	CD 49	168,5 m	En service	La Loire
Ingrandes	CD 49	532,7 m	En service	La Loire
Les Rosiers	CD 49	215 m	En service	La Loire
Montjean	CD 49	496 m	En service	La Loire
Marne – 51				
Dormans	CD 51	Travée de 82 m	En service	La Marne
Morbihan – 56				
La Roche Bernard	CD 56	407 m	En service	La Vilaine
Le Bono	CD 56	96 m	En service Classé MH en 1997	Auray
Lorois	CD 56	237 m	En service	Etel

Moselle – 57				
La Bousse			Démonté	La Moselle
Rapilly	CD 57	180 m	Démonté	La Moselle
Passerelle de Sarreguemines	Ville de Sarreguemines	84,8 m	En service	La Sarre
Nièvre – 58				
Cosne	CD 58 et CD 18	287 m	En service	La Loire
Le Guétin	CD 58	310 m	Démoli	L'Allier
Mornay	CD 58	211 m	Démoli	L'Allier
Fourchambault	CD 58	390 m	Démoli	La Loire
Oise – 60				
Borans	CD 60	119 m	En service	L'Oise
Croix St Ouen	CD 60	115 m	En service	L'Oise
Le Plessis Brion	CD 60	Travée de 42,83 m	En service	L'Oise
Précy-sur-Oise	CD 60		En service	L'Oise
St Leu d'Esserent	CD 60	105 m	En service	L'Oise
Pont de Warluis à Allonne			En service	L'A16
Puy-de-Dôme – 63				
Coudes	CD 63	145 m	En service mais réservé aux piétons	L'Allier
Parentignat	CD 63	120 m	Fermé Classé MH	L'Allier
Saut du loup	CD 63	Travée de 110 m	Démonté	L'Allier

Pyrénées Atlantique – 64				
Assat	CD 64	Travée de 77 m	En service	Le Gave de Pau
Lacq Abidos	CD 64	Travée de 78 m	En service	Le Gave de Pau
Passerelle Holzarte	Commune de Larau	70 m	En service	Le canyon d'Olhadubi
Pyrénées Orientales – 66				
La Cassagne	SNCF Réseau	253 m	En service Classé MH	La Têt
Rivesaltes Jacquet	CD 66	150 m	En service	L'Agly
Rhône – 69				
Chasse Givros	Métropole de Lyon	200 m	En service	Le Rhône
Condrieu	CD 69		En service	Le Rhône
Couzon mont d'Or	Métropole de Lyon	80 m	En service	La Saône
Feyzin		154 m	En service	Le canal de dérivation du Rhône à Pierre Bénite
Ile Barbe	Métropole de Lyon	100 m	En service	La Saône
Passerelle Masarick	Métropole de Lyon	170,4 m	En service	La Saône
Passerelle St Vincent	Métropole de Lyon	76,50 m	En service	La Saône
Passerelle St George Paul Couturier	Métropole de Lyon	87 m	En service	La Saône
Passerelle du Collège	Métropole de Lyon	42,5 – 96 – 42,5 m	En service	Le Rhône
Passerelle Nelson Mendela à DECINES	Métropole de Lyon	140 m	En service	Le Rhône
Solaize	Métropole du Grand Lyon	154 m	En service	Le canal de dérivation du Rhône à Pierre Bénite
Vernaison	Métropole du Grand Lyon	319,90 m	En service	Le Rhône
Sainte Colombe	Ville de Vienne	168 m	En service	Le Rhône

Savoie - 73				
Yenne-Nattages	CD 73	Travée 107 m	En service	Le Rhône
Haute-Savoie - 74				
Abime	CD 74	Travée de 74,80 m	En service	Le Chéran
La caille Charles Albert	CD 74	192 m	Classé MH	Les Usses
Passerelle François Baud à Morzine	Commune de Morzine	175 m	En service	La Dranse de Morzine
Pont suspendu de Grésin	Communes de Léaz (01) et de Eloise (74)	160 m	Route en impasse	Le Rhône
Paris - 75				
Passerelles des buttes Chaumont	Ville de Paris	65 m	En service	Le lac du parc
Passerelle du jardin de Reuilly	Ville de Paris		En service	Le jardin de Reuilly
Passerelle Île de Bercy-Île de Reuilly	Ville de Paris	20 m	En service	Le lac Daumesnil
Seine Maritime - 76				
Elbeuf Pont Guyemer	CD 76	161,6 m	En service	La Seine
Tancarville	CCI du Havre	960 m	En service	La Seine
Passerelle de Mayville	Gonfreville l'Orcher		En service	La Lézarde
Seine-et-Marne - 77				
Esbly	Commune d'Esbly	~ 50 m	En service	Le canal de Meaux à Chalifert
Tarn - 81				
Saint Sulpice	CD 81	165 m	En service	L'Agout
Viterbe	CD 81	115 m	En service	L'Agout

Tarn-et-Garonne - 82				
Auvillar	CD 82	241,16 m	En service mais limité à 16 T	La Garonne
Belleperche	CD 82	173,50 m	En service mais limité à 38 T	La Garonne
Bourret	CD 82	270 m	Fermé Classé MH en 1994	La Garonne
Cazals	CD 82	132 m	En service mais limité à 15 T	L'Aveyron
Coudol	CD 82	236,1 m	En service mais limité à 13 T	La Garonne
Feneyrols	CD 82	130 m	En service mais limité à 15 T	L'Aveyron
Lamagistère	CD 82	220,2 m	En service mais limité à 15 T	La Garonne
Le Saula	CD 82	195,9 m	En service	Le Tarn
Trescasses	CD 82	246 m	Démoli en 1991	La Garonne
Verdun	CD 82	154,8 m	En service	La Garonne
Villebrumier	CD 82	124 m	En service mais limité à 16 T	Le Tarn
Var - 83				
Saint Bachi	Société du canal de Provence	150 m	En service	La RD561 et le ruisseau de Saint Bachi
Vaucluse - 84				
Bollène	CD 84	250 m	En service mais limité à 16 T	Le canal Donzère Mondragon
Bollène	CD 84	230 m	En service	Le canal Donzère Mondragon
Armeniers	Commune de Sorgues	157,6 m	Fermé Classé MH	Le bras mort du Rhône
Vienne - 86				
Bonneuil-Matours	CD 86	115 m	En service Inscrit à l'inventaire en 2011	La Vienne
Vicq-sur-Gartempe	CD 86	130 m	Démoli en 1989	La Gartempe

Yonne - 89				
Cézy	CD 89	90 m	En service mais limité à 3,5 T. Gestion des températures négatives par barrières asservies	Yonne
Val-de-Marne - 94				
Port-à-l'Anglais	CD 94	250 m	En service Inscrit à l'inventaire en 1996	La Seine
Ivry	Ville d'Ivry	Travée de 120 m	En service	Voies ferrées
La Réunion - 974				
Rivière de l'Est	CD 974		Fermé sauf pour les piétons Classé MH	Rivière de l'Est

Annexe 2 - Méthodes de construction du tablier

Les méthodes de construction des tabliers des ponts suspendus sont dépendantes de leur date de réalisation, de la technologie employée (câbles porteurs et structure du tablier) mais aussi de leurs dimensions et de la nature et de la taille de la brèche.

Les problèmes à résoudre

La construction du tablier est une opération relativement complexe car la méthode devra répondre de manière satisfaisante aux préoccupations suivantes :

- éviter le glissement du câble sur les selles ;
- obtenir à la fin de la construction la géométrie recherchée, des pylônes en compression simple et un tablier sans flexion générale. Dans certains grands ouvrages récents, on a cependant utilisé la construction pour équilibrer par déformation imposée l'enveloppe des moments de flexion. Il s'agissait par exemple de maîtriser les pointes de moments au niveau des appuis sur pylônes de tabliers continus (dans ce cas particulier, on trouve de la flexion dans le tablier au réglage) ;
- assurer la stabilité au vent pendant les phases de construction ;
- assurer la stabilité longitudinale du tablier dans toutes les phases de construction ;
- conserver pendant toutes les phases de construction des déformées et sollicitations admissibles par les pylônes et le tablier déjà construit.

L'obtention du résultat escompté est compliquée par l'évolution permanente de la géométrie et de la longueur des câbles porteurs lors de la construction. À chaque phase, on modifie en effet la forme de ce qui est déjà construit alors qu'il convient de s'attacher à ne pas enfermer de déformations dans le tablier.

Quand on réalise un tablier classique de géométrie finale convexe en chargeant symétriquement les câbles et en fixant les éléments sur les suspentes réglées à leur longueur finale définitive, on obtient un profil en long concave jusqu'à ce que la travée centrale soit construite à 70 % environ.

Le montage traditionnel

On peut utiliser l'une des méthodes suivantes :

- transport des éléments par blondins ;
- transport des éléments sur le tablier déjà construit et assemblage à l'avancement ;
- amenée des éléments par voie terrestre et hissage à l'aide de ponts mobiles évoluant sur les câbles porteurs ou sur des câbles provisoires ;
- amenée des éléments par barge et hissage à l'aide de ponts mobiles évoluant sur les câbles porteurs ou sur des câbles provisoires.

Pour ne pas enfermer de déformations dans le tablier, il est possible :

- d'utiliser des assemblages provisoires que l'on peut libérer lors d'un réglage final ;
- de laisser des articulations entre éléments de tablier que l'on ne bloque qu'une fois les câbles totalement chargés et les réglages géométriques effectués ;
- d'assembler les tronçons de tablier à l'avancement en s'imposant des critères géométriques de positionnement et en associant la construction du tablier à des phasages de réglage de suspentes.

Il convient dans tous les cas de retenir des cinématiques de chargement des câbles porteurs limitant le plus possible leurs changements de forme (chargements symétriques).

Cinématiques possibles de montage du tablier dans le cas d'une travée suspendue

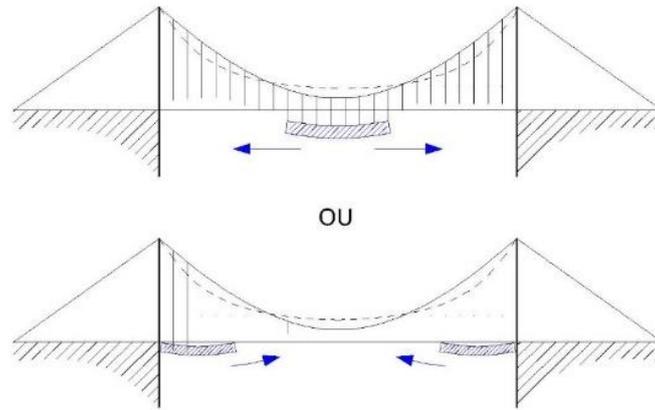


Figure 2.01 : Cinématiques possibles de montage du tablier dans le cas d'une seule travée suspendue

Cinématiques de montage du tablier dans le cas d'un pont à trois travées suspendues

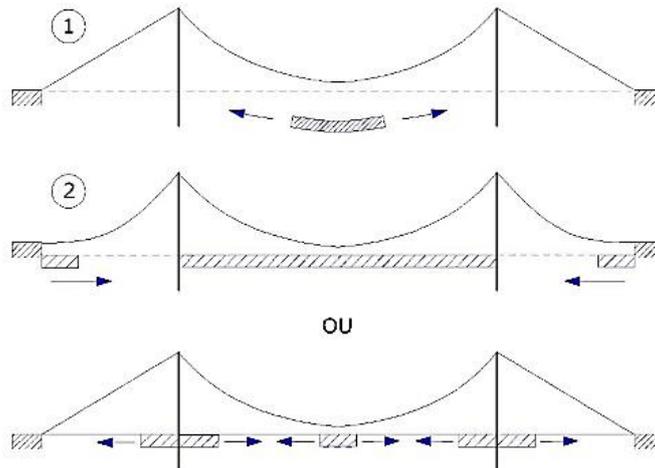


Figure 2.02 : Cinématiques possibles de montage du tablier dans le cas d'un pont à trois travées suspendues

Le montage sur palées

Dans le cas de géométries favorables, il est envisageable de construire le tablier sur palées, par grutage ou par lançage.

Dans ce cas, l'optimisation de l'espacement des palées peut être un critère de dimensionnement du tablier ou des palées car les poutres de rigidité des ponts suspendus sont naturellement peu sollicitées à l'effort tranchant. Ce mode de construction peut donc avoir une influence significative dans le cas de poutres treillis.

Le chargement de la suspension peut ensuite être réalisé de manière très simple par raccourcissement progressif des suspentes et/ou vérinage sur les palées.

Une solution prototype - Le pont du Chavanon

Le pont suspendu du Chavanon permet le franchissement de la rivière du Chavanon par l'A89 entre Tulle et Ussel. Son tablier est un caisson en ossature mixte, d'une largeur de 22 m, muni de bracons.

Le tablier de 360 m passe entre les jambes des pylônes auxquels il est suspendu sur une longueur de 300 m.

Le tablier a été lancé à partir des deux rives d'une manière originale. Le caisson métallique n'était pas apte à supporter un porte-à-faux supérieur à 50 m et il n'a pas été utilisé de palée entre les pylônes.

Le câble porteur a été équipé d'une série de suspentes provisoires. Les demi-tabliers ont été lancés à partir des deux rives en les accrochant successivement à ces suspentes au fur et à mesure du lancement.

Les suspentes étaient successivement tendues et détendues à l'aide de mouvements d'avancement et de recul du tablier. Le recul permet de détendre la suspente arrière et de la désaccoupler. L'avancement permet en inclinant la suspente arrière « d'aller chercher » et d'accrocher la suspente suivante.

Annexe 3 - Modes de fonctionnement

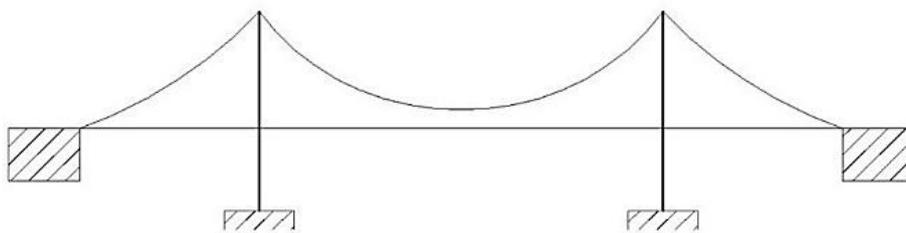
Cas du pont suspendu à trois travées

Les travées de rive ont une longueur de l'ordre du tiers de celle de la travée centrale.

Les ponts à trois travées suspendues constituent des solutions modernes et largement utilisées pour le franchissement des grandes brèches.

La flèche du câble porteur dans la travée centrale est en général de $1/12$ à $1/9$.

Cas d'une charge générale appliquée sur tout le tablier



Charge de poids propre superstructures et équipements
(pas de déformations du tablier et des pylônes)

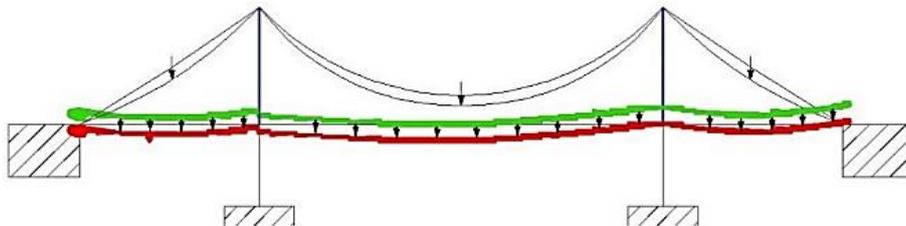


Figure 3.01 : Déformée dans le cas d'une charge générale appliquée sur tout le tablier

Déformées de la structure dans le cas de charges partielles sur un tablier continu

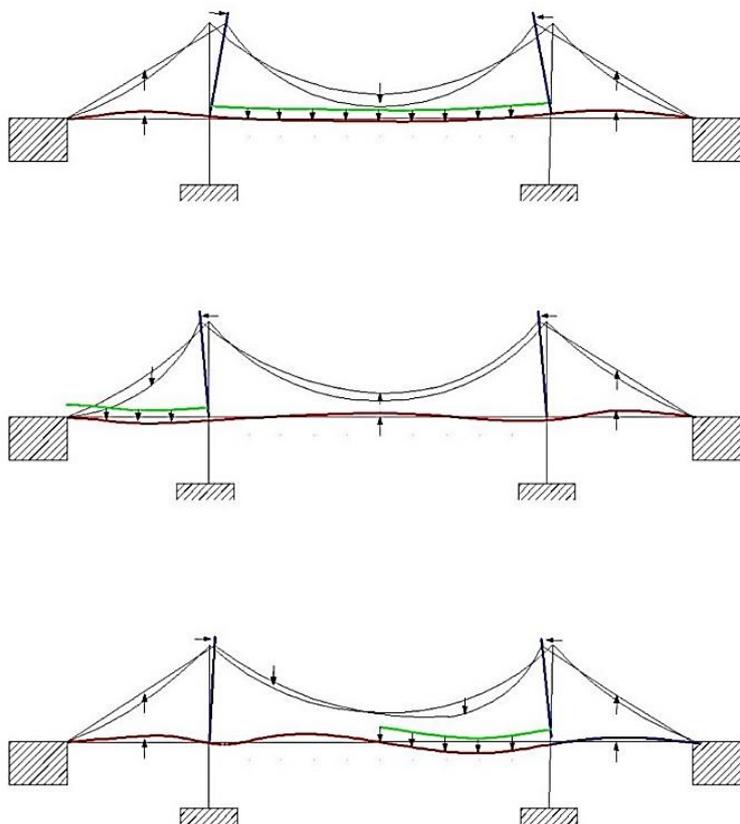


Figure 3.02 : Déformées de la structure dans le cas de charges partielles (cas d'un tablier continu)

Déformées de la structure sous une action thermique dans le câble d'un tablier non continu

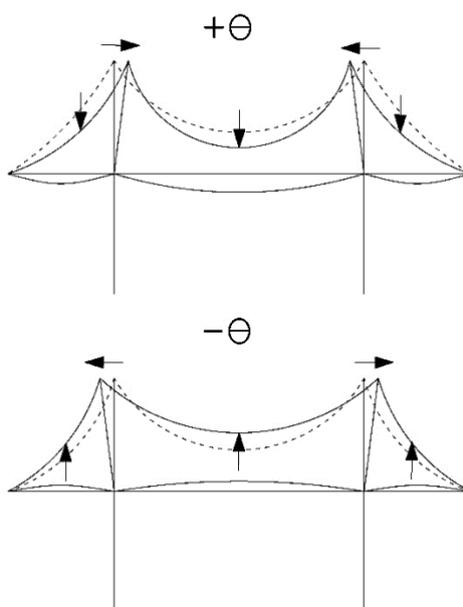


Figure 3.03 : Déformées de la structure sous une action thermique dans le câble d'un tablier non continu

Travées multiples, pylônes massifs et câbles de tête

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 est l'utilisation de câbles de tête.

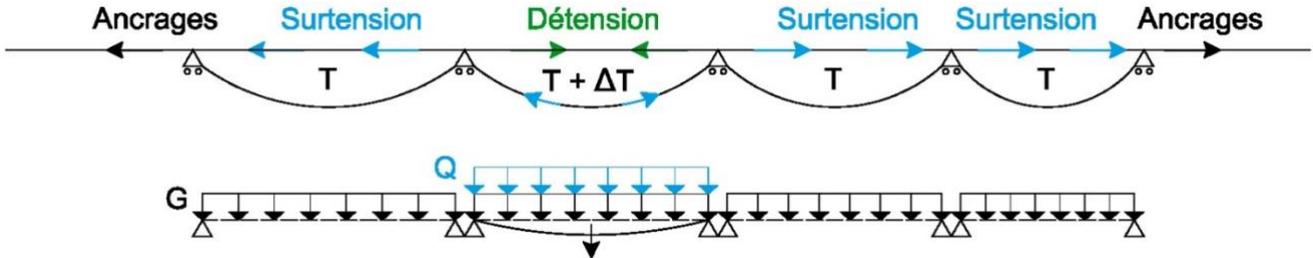


Figure 3.04 : Rôle des câbles de tête en cas de chargement de la seconde travée

Comportement d'un câble de tête

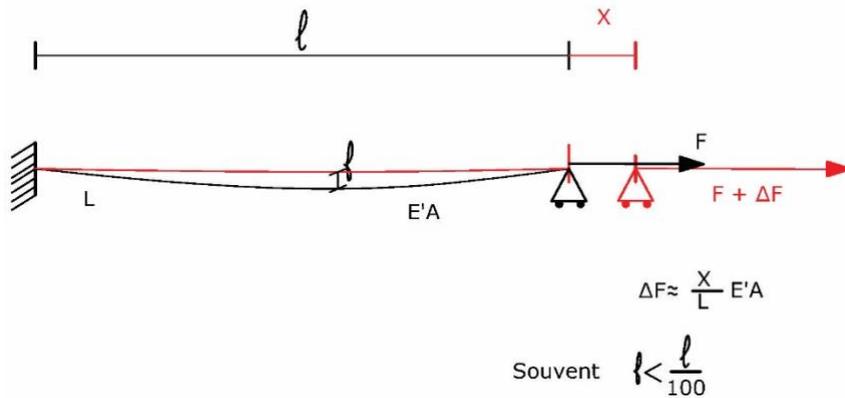


Figure 3.05 : Comportement d'un câble de tête

Le câble de tête présente souvent, lors du réglage, une flèche inférieure au 1/100 de la portée car il n'est chargé verticalement que par son poids. Quand il est suffisamment tendu, il oppose au déplacement d'appui une réaction proche de celle du ressort associé $K \# E'A/l$ car l'effet de la variation de flèche sur sa longueur est négligeable.

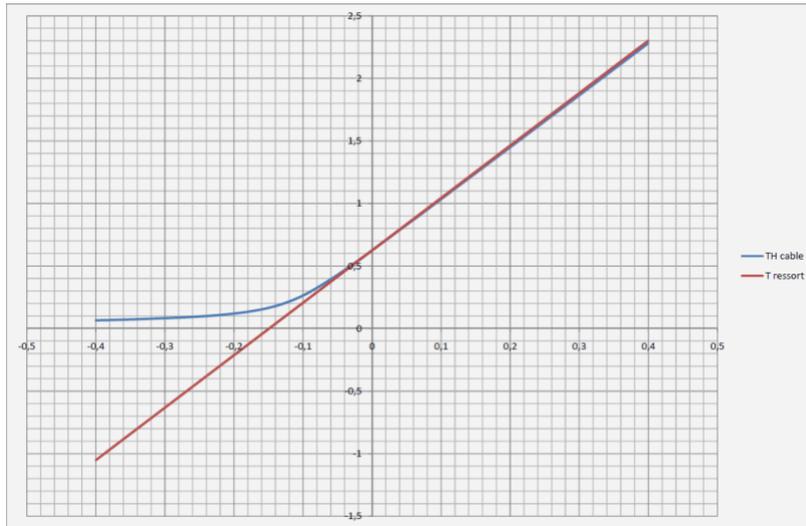


Figure 3.06 : Courbe effort-déplacement dans un câble de tête de 93 m comparée au ressort de raideur EAI

Le réglage des raideurs et des sections de câble consiste à faire fonctionner le plus possible le câble dans le domaine du comportement quasi linéaire ou à se limiter au début du comportement non-linéaire.

Comportement du câble porteur vis-à-vis d'un déplacement d'appui horizontal

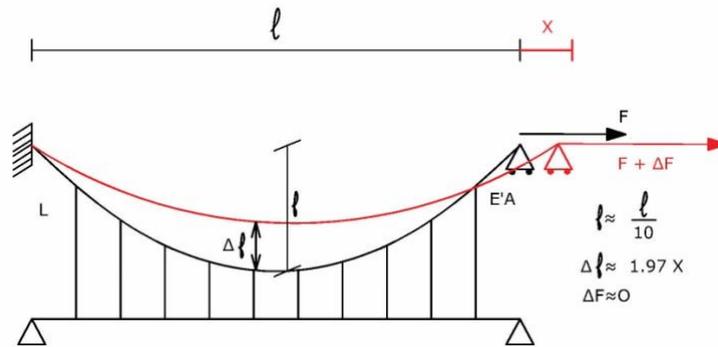


Figure 3.07 : Impact d'un déplacement d'appui horizontal sur le câble porteur

Le câble porteur présente une flèche habituellement de $l/9$ à $l/12$. Une variation de la corde se traduit alors par une variation de la flèche de l'ordre du double de la variation de la longueur de la corde. Par contre, la variation de traction est négligeable. Le câble porteur présente donc une faible capacité à s'opposer à un déplacement d'appui.

Rôle des câbles de tête

Dans le cas de travées multiples, l'équilibre des points d'appui des câbles porteurs impose l'égalité des efforts de chaque côté des appuis des câbles.

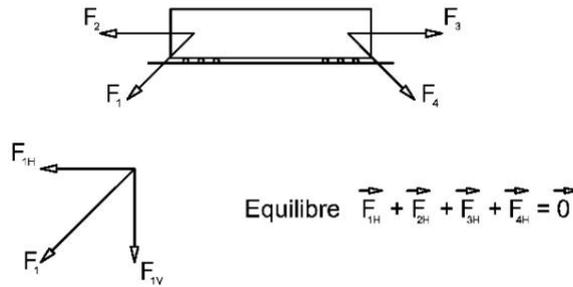


Figure 3.08 : Chariot d'appui

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, ce qui permet 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 des câbles de tête. Cette option est optimale pour le dimensionnement des câbles de tête des câbles de retenue et des massifs d'ancrage.

Les câbles de tête font partie intégrante de la suspension. En provoquant l'échappement d'un chariot d'appui, la rupture d'un de ces câbles peut entraîner la ruine de l'ouvrage.

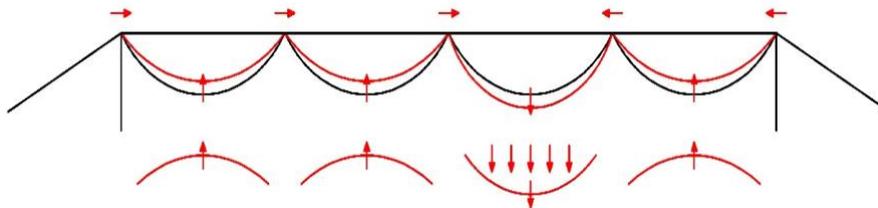


Figure 3.09 : Schéma des déplacements en cas de chargement limité à une seule travée : les chariots se déplacent vers la travée chargée ; le tablier descend dans la travée chargée et monte dans les travées voisines.

Annexe 4 - Piles, culées, massifs d'ancrage

Comme dans la plupart des structures de génie civil, le bon comportement des fondations est vital pour la structure. Il s'agit de reprendre les efforts appliqués avec des déformations suffisamment faibles pour ne pas altérer le fonctionnement de l'ouvrage. Pour cela, il convient de redescendre les efforts au niveau des sols ayant les caractéristiques mécaniques suffisantes pour les reprendre avec des déplacements acceptables. Les ponts suspendus servant principalement à franchir des cours d'eau, la maîtrise des affouillements est vitale.

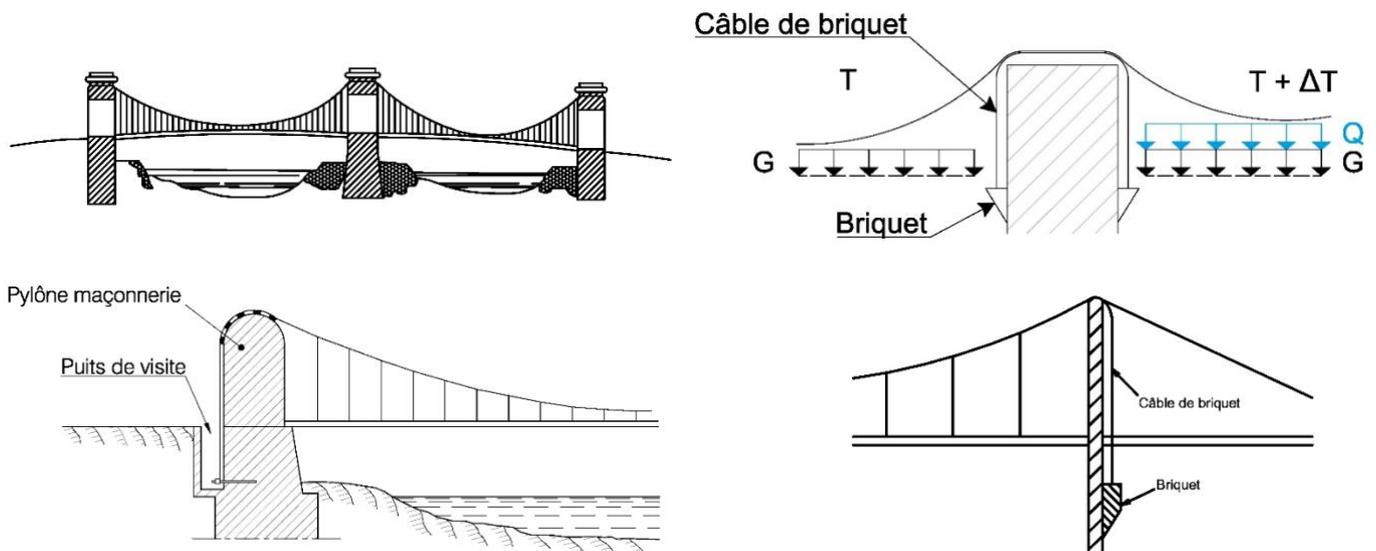
Pour plus de précisions concernant les fondations, on se reportera aux fascicules 10 et 12 de l'ITSEOA.

Les massifs et chambres d'ancrage

Hormis dans les 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 où l'effort de traction des câbles porteurs est diffusé dans le sol.

Ancrage sur des 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.



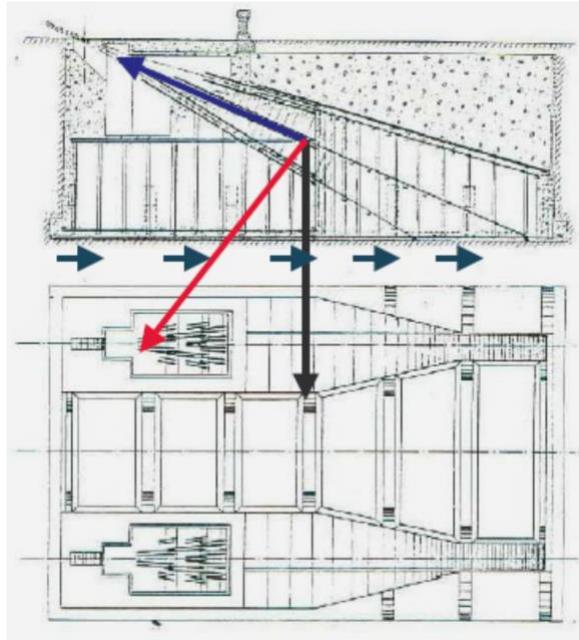
Figures 4.01 à 4.04 : Ancrages sur pylônes massifs

Dans ce cas, les pylônes supportent la composante horizontale de la traction des câbles et sont donc fléchis. La redescente 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.

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.

Les massifs poids

On a très rapidement recherché un ancrage des câbles porteurs à l'arrière des pylônes. Cet ancrage a souvent été réalisé à l'aide d'un massif poids.



Figures 4.05 et 4.06 : Équilibre des efforts dans un massif poids

Les efforts verticaux et le moment de renversement (dont la résultante est figurée en rouge) sont équilibrés par le diagramme de contrainte de réaction sous le massif alors que les efforts horizontaux sont repris par le frottement (et éventuellement un peu de cohésion)

Dans le cas des massifs d'ancrage du pont d'Aquitaine, le massif est appuyé sur une puissante fondation à l'avant et le poids du massif, éventuellement complété par celui d'un lest, équilibre le moment de renversement engendré par la traction des câbles porteurs. Dans le cas du massif de la rive droite qui est semi enterré, la direction des puits constituant la fondation est celle de la résultante des forces appliquées.

Les massifs poids ont parfois été réalisés sous forme d'une dalle remblayée avec un béton maigre et orientée dans le sens des efforts.

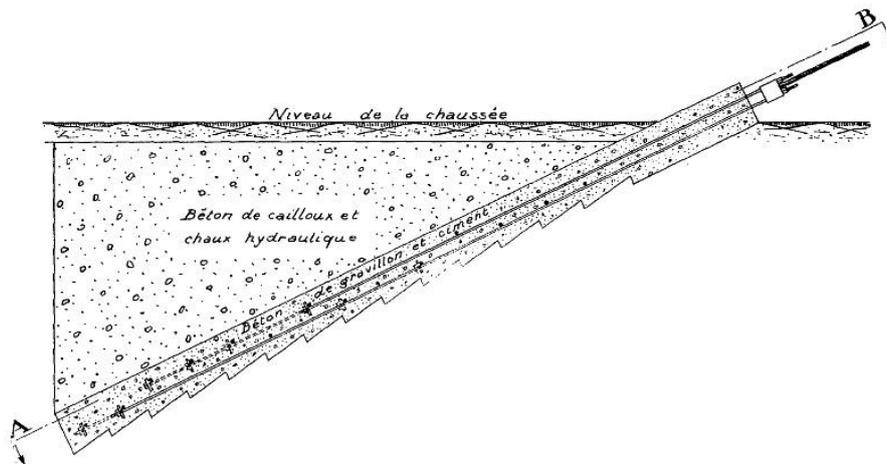


Figure 4.07 : Massif poids constitué par une dalle inclinée

Lors de l'élaboration du projet du pont d'Ancenis, Jean Courbon a conçu des massifs d'ancrage originaux en forme de L inversé. Leur partie verticale située à l'avant est chargée de ramener la résultante des efforts sur le substratum compact.

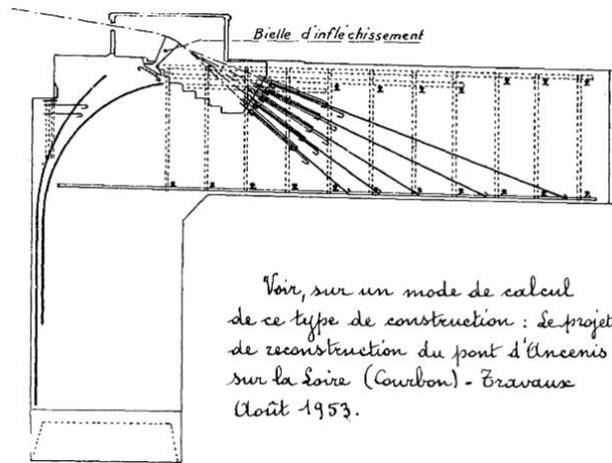


Figure 4.08 : Massif d'ancrage en forme de L inversé



Figures 4.09 et 4.10 : Massifs d'ancrage

Utilisation d'une butée sur la fondation du pylône

L'appui des pylônes étant fortement chargé, il peut supporter par frottement un effort horizontal intense. Cette capacité a été utilisée en appuyant les massifs d'ancrage sur la fondation du pylône par l'intermédiaire de butons ou d'un massif de sortie à l'air libre des culots d'ancrage

Les ancrages dans des chambres à l'extrémité de galeries et de puits étaient souvent dans un milieu très humide. Ces organes, vitaux pour la structure, se sont rapidement dégradés par corrosion. Il a donc très souvent été décidé de sortir les culots d'ancrage dans des parties aériennes à l'extérieur des massifs, le report des charges dans les parties noyées étant confié à des barres de fort diamètre, filetées à leur extrémité. En effet, les barres résistent mieux que les câbles et culots à la corrosion car la surface d'attaque pour la même section d'acier utile est beaucoup plus faible.

Ces travaux ont souvent été accompagnés d'un remplissage des galeries et chambres avec du béton. L'objectif de ce remplissage était une protection définitive des barres et de leurs ancrages par le milieu basique du béton.

Quand des barres servant à la mise à l'air libre des culots se sont révélées plus tard fragiles, le comblement avec du béton se révéla problématique dans la mesure où il complique beaucoup le remplacement de ces barres.

Annexe 5 - Suspension

La suspension est composée principalement :

- de câbles dont les éléments constitutifs sont des fils de diamètre 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 petits 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 trouve 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 même utilisés dans des dispositions géométriques variées (en nappes, en couronnes ou en faisceau).

La constitution des suspentes, de leurs attaches et les systèmes d'appui de câbles font eux aussi appel à des dispositions très variées et des solutions technologiques multiples.

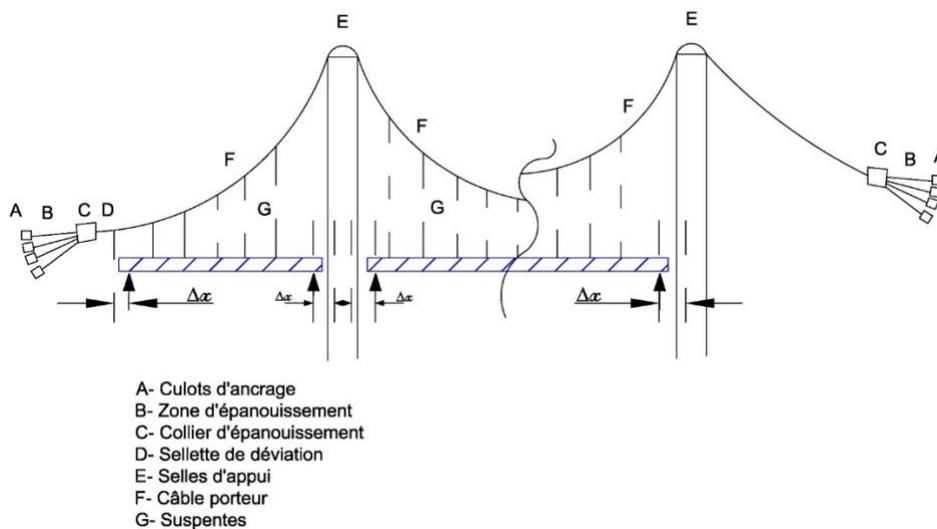


Figure 5.01 : Différents éléments constituant la suspension

Les câbles

Aciers utilisés dans les câbles – Mode d'élaboration des fils

Le choix des aciers et du mode de fabrication des fils constitutifs de la suspension a toujours été orienté dans le sens d'une augmentation des caractéristiques mécaniques (résistance à la traction, limite d'élasticité) afin d'alléger la suspension, d'une amélioration de leur ductilité (allongement à la rupture) et de leur aptitude à la torsion et au pliage afin de faciliter la confection des câbles.

À l'usage, il est apparu qu'il convenait de prendre également en compte les caractéristiques de durabilité des aciers, c'est-à-dire leur résistance aux divers types d'endommagements.

Ainsi, les aciers à haute résistance se détériorent-ils à la fois par :

- corrosion généralisée (perte de section par dissolution) ;
- corrosion localisée (formation de piqûres, de zones occluses) ;
- corrosion sous contrainte (cas de corrosion apparaissant lorsque l'eau atteint les aciers, soit après condensation, soit par ruissellement).

C'est pourquoi l'arrivée d'eau à l'intérieur des câbles est un problème que l'on a tenté de résoudre en utilisant par exemple des fils périphériques profilés (câbles clos) et en prenant des dispositions constructives pour éviter la stagnation de l'eau au niveau des points de pénétration connus. Comme l'efficacité de ces mesures ne peut être garantie totalement, une protection supplémentaire des câbles est souvent réalisée. Cela peut être une galvanisation des fils constitutifs, un produit de remplissage entre les fils ou encore le gainage des monotorons.

Dans les câbles toronnés, les micro déplacements au niveau des contacts inter filaires (entre fils des différentes couches ou entre fils et pièces fixes) peuvent provoquer de la fatigue de contact (fretting et fretting-fatigue) conduisant à une dégradation prématurée du câble. Lorsque cette fatigue se conjugue à une corrosion (fretting-fatigue et corrosion), la cinématique d'endommagement peut être accélérée.

L'apparition des fissures induites par ces phénomènes est très largement retardée par une lubrification ou une galvanisation des fils.

Métallurgie des aciers utilisés

Les fils ronds

Les aciers des fils les plus anciens avaient une faible teneur en carbone. Le tableau ci-dessous donne les teneurs couramment rencontrées sur ces aciers avec des valeurs exprimées en % :

C	Mn	P	S	Si	Cu
0,10	0,03	0,066	0,015	0,03	0,058

On note des teneurs élevées en phosphore et faibles en silicium, manganèse et surtout en carbone, à la limite de celles du fer et de l'acier doux.

À cette époque, les fils étaient élaborés à chaud. La résistance à la traction, de 60 kg/mm² soit 600 MPa vers 1830, atteignait 70 kg/mm² soit 700 MPa en 1870. Ces valeurs "élevées" pour un acier à bas carbone étaient obtenues par la présence de cristaux durs tels que des inclusions non métalliques qui engendraient dans l'acier des ségrégations et des hétérogénéités de structure. Ces caractéristiques conféraient aux aciers une sensibilité notable à la corrosion par piqûres et à un enrouillement par zones (dissolution généralisée).

- en 1880, la résistance à la traction était d'environ 90 kg/mm² soit 900 MPa ; en 1900, elle atteignait 100 kg/mm² soit 1000 MPa ;
- vers 1950, la composition chimique de l'acier des fils élémentaires était voisine de celle indiquée ci-dessous (valeurs exprimées en %) :

C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr
0,60	0,63	0,033	0,026	0,18	0,108	0,026

La résistance à la traction était de l'ordre de 120 kg/mm² soit 1200 MPa.

Puis des taux de carbone plus élevés, compris entre 0,75 et 0,80 %, permirent d'atteindre des résistances proches de 150 à 160 kg/mm² soit 1500 à 1600 MPa.

- En 1965, cette résistance à la traction était portée à 165 - 180 kg/mm² soit 1650 à 1800 MPa pour les fils ronds et à 155 - 170 kg/mm² soit 1550 à 1700 MPa pour les fils profilés en Z.

Une composition chimique typique de cette époque est celle des aciers constitutifs de l'ancienne suspension du pont d'Aquitaine mis en service en 1967 (valeurs exprimées en %) :

C	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	P	Si	S
0,78 à 0,85	0,53 à 0,6	0,005 à 0,011	0,001 à 0,007	0,046 à 0,057	0,027 à 0,049	0,014 à 0,029	0,18 à 0,26	0,09 à 0,019

L'amélioration des propriétés mécaniques a été obtenue en relevant la teneur en carbone de l'acier, en affinant sa micro-structure et en utilisant, pour la mise en forme finale, des écrouissages à froid par laminage ou tréfilage.

Les aciers modernes sont pratiquement entièrement perlitiques à structure très fine. Le fil machine laminé à chaud est fabriqué par les forges, désoxydé puis patenté (traitement thermique) pour lui donner une structure suffisamment ductile pour le tréfilage. Cette opération s'effectue à froid et permet d'obtenir, en plusieurs passes, le diamètre définitif du fil.

On trouvera d'autre part ci-dessous les teneurs de certains aciers utilisés récemment :

C	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	P	Si	S	V	Al	N
0,79 à 0,83	0,68 à 0,695	0,25 à 0,29	0,006 à 0,007	0,029 à 0,037	0,027 à 0,067	0,004 à 0,009	0,21 à 0,29	0,003 à 0,006	0,125 à 0,131	0,029 à 0,043	0,0045 à 0,0068

Teneurs de l'acier des fils utilisés en 2010 sur le pont du Teil

C	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	P	Si	S	V	Al	N
0,90 à 0,95	0,25 à 0,45	0,15 à 0,30	< 0,02	< 0,10	< 0,10	< 0,03	0,10 à 0,30	< 0,03	NC	< 0,01	< 0,007

Teneurs de l'acier des fils utilisés en 2006 sur le Grand Pont sur la Loire

Les fils utilisés dans les câbles des ouvrages d'art modernes sont en aciers non ou peu alliés avec une teneur en carbone le plus souvent voisine de 0,8 % (eutectoïde). Ceci entraîne une microstructure presque entièrement perlitique à taille de grains très fine, qui consiste en une alternance de lamelles de cémentite (Fe₃C) et de ferrite (fer alpha).

- Le retour d'expérience dans le domaine des câbles de suspension est basé sur l'emploi d'aciers hypo eutectoïdes (moins de 0,8 % de carbone), aciers jusqu'alors habituellement employés et sur lesquels plusieurs décennies d'études de comportement mécanique et de durabilité ont été fondées.
- Une éventuelle évolution vers des aciers eutectoïdes ou hyper eutectoïdes (plus de 0,8 % de carbone) sort du cadre de ces connaissances et du retour d'expérience. Notamment, on peut craindre la formation éventuelle de cémentite primaire au joint de grains. Cette présence de cémentite primaire aurait un effet fragilisant pour la microstructure. En l'absence d'étude documentée, il semble opportun de retenir une nuance d'acier hypo eutectoïde, sauf justification, pour éviter ce risque. Dans le cas d'autres nuances, des études métallurgiques spécifiques seraient à prescrire pour se prémunir de ce risque.

L'amélioration des propriétés mécaniques s'est accompagnée d'une amélioration de l'homogénéité de la structure qui confère aux fils une meilleure tenue à la torsion et donc des facilités de toronnage des câbles. Cependant, des phénomènes de corrosion fissurante restent présents sur les fils à haute résistance. On note à ce sujet que des teneurs plus importantes en éléments d'alliage dans l'acier (cuivre, phosphore principalement) ont une influence sur la tenue à la fissuration par corrosion sous contrainte.

D'autre part, l'augmentation de la résistance à la traction est obtenue partiellement par une texture et un allongement des grains dans le sens longitudinal. Les propriétés mécaniques dans le sens transversal s'en trouvent alors réduites. Cette influence se manifeste essentiellement par une sensibilité à l'effet d'entaille, ou à l'effet de rupture par cisaillement (traction déviée) au niveau des déviations brutales des câbles qui peuvent se produire aux culots, aux selles d'appui ou aux colliers des suspentes.

Les fils Z

À la différence des fils ronds qui sont obtenus par tréfilage, les fils profilés (couches extérieures des câbles clos profilés en Z par exemple) sont obtenus par laminage à froid à partir d'un fil machine préalablement traité thermiquement par patentage, afin que la structure de l'acier soit affinée.

Les fils Z présentent, de par leur fabrication, des caractéristiques plus basses que les fils ronds.

D'un point de vue normatif, les fils constitutifs des câbles répondent à la norme NF EN 10264-3 de 2012 avec, pour les fils revêtus de classe A, des résistances mécaniques de 1570-1770 MPa pour les fils ronds et de 1370-1570 MPa pour les fils Z.

Résistance des fils constitutifs des câbles de ponts - Tableau de synthèse

Année	Classe de résistances des fils en MPa
1830	600
1870	700
1880	900
1900	1000
1950	1200
1960	1500 -1600
1970	1650 -1800
Pour information, ci-dessous les classes de résistance définies par la norme NF EN 10264-3 de 2012 pour les fils revêtus de classe A	
Fils ronds	1570 -1770
Fils Z	1370 - 1570

Évolution des câbles

L'évolution des résistances mécaniques atteintes depuis le XIX^e siècle est reportée sur le graphique ci-dessous :

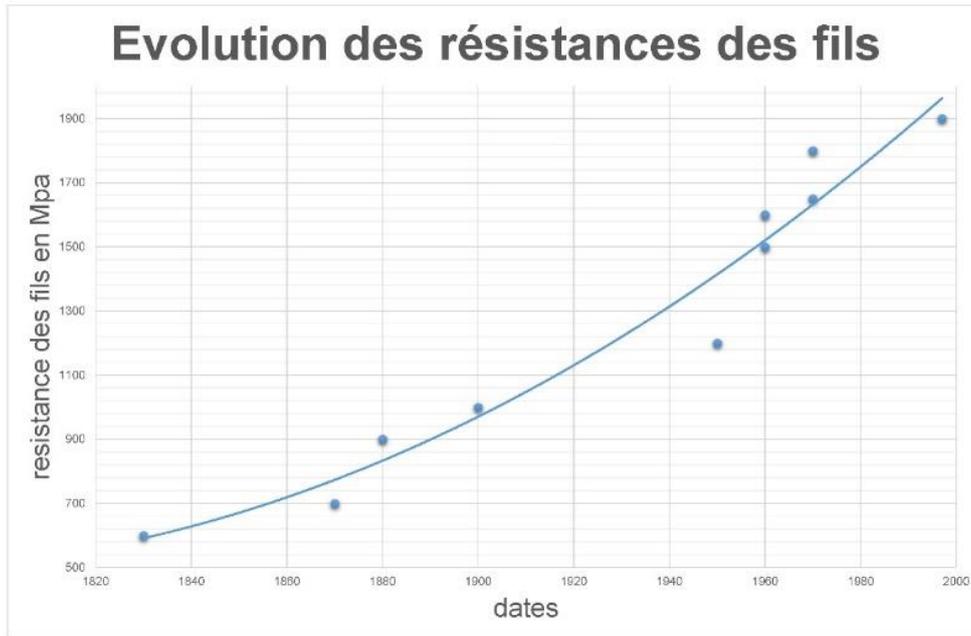


Figure 5.02 : Évolution de la contrainte de rupture de l'acier des fils des câbles depuis le 19^e siècle

On note une évolution pratiquement linéaire, entre 1820 et 2000, des caractéristiques mécaniques des aciers utilisés dans les fils de câbles.

Fabrication des fils

Les fils en acier sont réalisés à partir de fils machines dont la forme cylindrique est obtenue par laminage à chaud. L'acier est entraîné et écrasé entre plusieurs cylindres motorisés afin de lui donner une section cylindrique de l'ordre de 10 mm de diamètre.

Les fils pour câbles de ponts ont un diamètre compris entre 3 et 6 mm.

Pour fabriquer un fil, la section du fil machine est réduite soit par tréfilage, ce qui correspond au procédé actuel, soit par un autre laminage à chaud (ancien procédé). À la suite de cette mise en forme, les fils utilisés dans les câbles de pont ont un diamètre compris entre 3 et 6 mm. Le tréfilage est effectué à température ambiante alors que le laminage à chaud est suivi d'un refroidissement rapide (trempe).

Traitement thermique avant tréfilage

Un fil machine a une structure métallographique difficile à tréfiler, c'est pourquoi un traitement thermique (patentage) est appliqué au fil machine avant tréfilage pour que l'acier soit formé de très petits grains de perlite (alternance de lamelles de carbure Fe₃C, appelé cémentite, et de Fer alpha appelé ferrite). Le patentage consiste à chauffer le fil machine jusqu'à environ 950 degrés puis à le refroidir dans un bain de plomb ou de sels fondus entre 550 et 650 degrés.

Le tréfilage

Le passage du fil machine au fil pour câble se fait actuellement par tréfilage. Le tréfilage consiste à réduire progressivement la section d'acier par passage du fil à travers de filières de diamètre décroissant. Cette opération s'effectue à froid. La machine sur laquelle s'effectue cette opération est schématiquement d'un cabestan sur lequel s'enroule le fil tiré à travers la filière. La machine de tréfilage associe plusieurs passes successives. Le nombre de passes et la réduction du diamètre du fil à chaque passe dépendent de l'aptitude de l'acier à se déformer sans casser.

La filière présente schématiquement et en suivant le sens d'avancement du fil :

- une entrée (paraboloïde de révolution) ;
- un cône de travail où s'effectue la réduction de section ;
- une portée cylindrique ;
- une sortie.

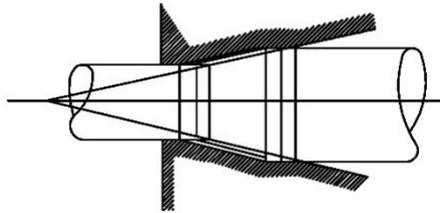


Figure 5.03 : Réduction du diamètre du fil par passage à travers des filières

Le tréfilage augmente la résistance mécanique des aciers par écrouissage et orientation des grains dans le sens longitudinal. Il est ainsi possible de produire des fils dont la résistance à la traction est de l'ordre de 2400 MPa mais pour que l'allongement à la rupture reste assez élevé ($> = 6\%$), il convient actuellement de limiter cette résistance à 2100 MPa.

Les fils profilés

À la différence des fils ronds qui sont obtenus par tréfilage, les fils profilés en Z ou en S (couches extérieures des câbles clos profilés) sont obtenus par laminage à froid d'un fil machine préalablement traité thermiquement par patentage, afin que la structure de l'acier soit affinée. Le fil machine employé présente une structure identique à celle du fil machine patenté utilisé pour le tréfilage. La structure obtenue après patentage permet les fortes déformations plastiques imposées par le laminage à froid et donc la réalisation de profils complexes sans rupture ni décohésion. Les propriétés mécaniques obtenues sont inférieures de 10 à 15 % à celles qui peuvent être atteintes par tréfilage d'un même fil machine. La sensibilité de ces fils aux effets de traction déviée et d'entaille est également notable.

La mise en forme actuelle de ces fils profilés peut aussi se faire par tréfilage.

La galvanisation

La galvanisation à chaud des fils ronds ou profilés les protège des phénomènes de corrosion généralisée (dissolution) même si le revêtement est légèrement détérioré (effet barrière et protection galvanique). Cette galvanisation par trempe dans un bain de zinc fondu est généralement postérieure à tout traitement technologique de mise en forme. Il est cependant possible de rajouter une passe de tréfilage afin de garantir le calibre du fil. La galvanisation entraîne une diminution des propriétés mécaniques du fil clair d'environ 10 %.

C'est pourquoi les fils tréfilés ou laminés à froid sont plus écrouis lorsqu'ils doivent être galvanisés que lorsqu'ils sont utilisés sans galvanisation. Hormis cette différence, les fils constitutifs pour câbles toronnés à fils galvanisés sont identiques à ceux utilisés pour les câbles toronnés à fils clairs.

Chaque fil est galvanisé en usine. L'épaisseur de la galvanisation est telle qu'il y ait de 280 à 430 g de zinc/m² ce qui correspond à une épaisseur moyenne de 40 à 60 μm . Il est important que cette couche ne soit ni trop fine, ni trop épaisse car dans ce dernier cas, des problèmes de décollement de la galvanisation peuvent se produire.

Les principales caractéristiques des différents types de câbles

Les câbles à fils parallèles

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



Figure 5.04 : Principe des câbles à fils parallèles

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

Un indice des vides de l'ordre de 25 % permet d'envisager une déshumidification du câble.

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

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

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

Des méthodes, encore en partie expérimentales, ont été mises au point pour traduire ces constats en capacité résiduelle du câble et permettent de déterminer un coefficient de sécurité.

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

Les câbles torsadés

Le câble torsadé inventé en première moitié du XIX^e siècle offre une grande souplesse : il est notamment largement utilisé en levage et pour les câbles d'ascenseurs. Il a été utilisé dans les ponts pour réaliser des suspentes et des haubans pour des tabliers légers. Le plus souvent, les fils sont rassemblés en torons de 7 à 19 fils câblés sur un toron central pouvant éventuellement être réalisé à partir de fibres textiles. Le coefficient de remplissage est de l'ordre de 0,55 et le module du câble est inférieur à 120 000 MPa.

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



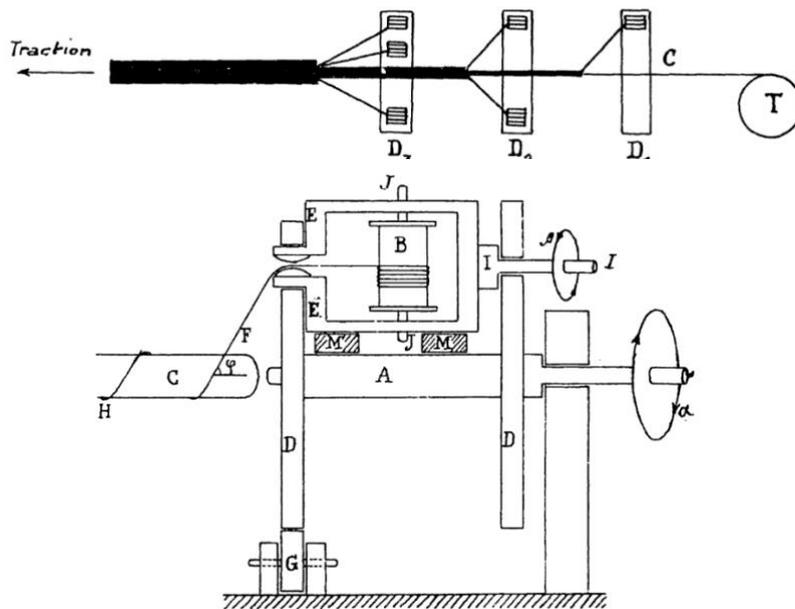
Figure 5.05 : Principe des câbles torsadés

Les câbles toronnés

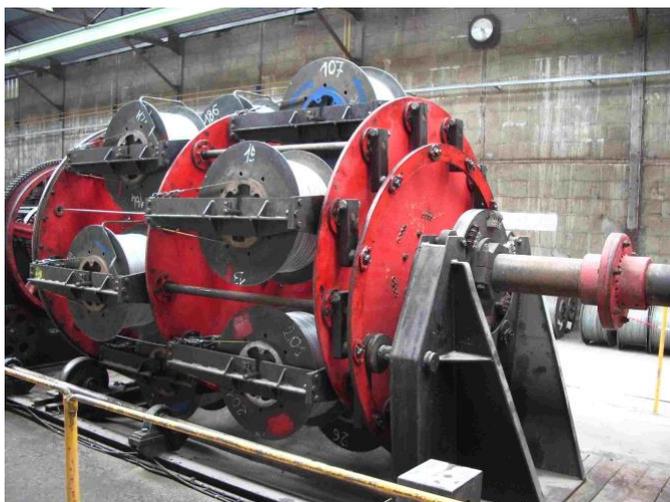
Ces câbles sont ceux que l'on rencontre le plus souvent sur les ponts suspendus français. Ils sont réalisés par enroulement en hélice des fils autour d'une âme constituée le plus souvent d'un fil rectiligne. Chaque couche comporte 6 fils de plus que la couche précédente. Pour obtenir une sollicitation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



Figure 5.06 : Principe des câbles toronnés



Figures 5.07 et 5.08 : Principes d'une câbleuse (extraits du cours de M. Grelot)



Figures 5.09 et 5.10 : Câbleuse Baudin-Châteauneuf

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques des principaux types de câbles toronnés :

Structure des câbles toronnés				
Nombre de couches	Nombre de fils d'une couche	Nombre de fils du câble	% d'acier sur la couche externe	% d'acier sur les deux dernières couches
Ame	1			
1	6	7	86 %	
2	12	19	63 %	95 %
3	18	37	49 %	81 %
4	24	61	39 %	69 %

5	30	91	33%	59%
6*	36	127	28 %	52 %
7*	42	169	25 %	46 %
8*	48	217	22 %	41 %
9	54	271	20 %	38 %
10	60	331	18 %	34 %

Nota : les câbles les plus courants sont ceux qui comportent une astérisque dans la première colonne

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

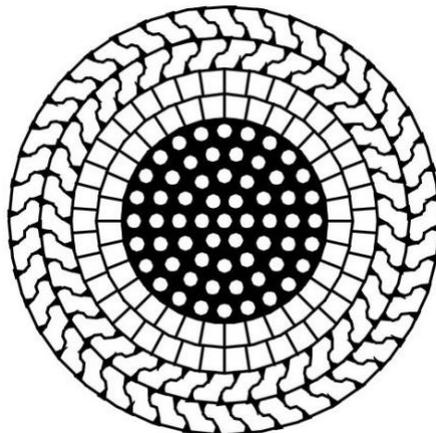


Figure 5.11 : Principe de l'utilisation de fils profilés sur les couches extérieures d'un câble clos

Le module du câble varie de 150 000 à 175 000 MPa. Les câbles clos ont un module généralement plus élevé que les câbles constitués de fils ronds.

La résistance caractéristique du câble est pratiquement égale à 95 % de la somme des résistances caractéristiques des fils constitutifs.

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

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

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

Les câbles élémentaires de 72 mm de diamètre ayant servi à la fabrication de la suspension initiale du pont de Tancarville avaient une longueur de 1070 m et un poids de 26,5 t (travée centrale de 608 m).

Autres types de câbles

Les mono torons protégés individuellement, utilisés d'abord en précontrainte extérieure, ont évolué pour être utilisés dans les haubans multi torons protégés individuellement.

Les torons ont évolué pour cette application en un produit élaboré spécifiquement. Ils sont galvanisés et protégés par une gaine extrudée en PEHD et les vides entre les fils élémentaires et la gaine sont colmatés avec un produit hydrophobe. Ils sont ancrés individuellement dans des ancrages à clavettes et rassemblés dans une enveloppe externe générale.

Cette technologie a été modifiée afin de pouvoir être appliquée aux câbles porteurs de ponts suspendus. Les problèmes principaux sont le passage sur les selles et l'attache des suspentes où un effort tangentiel est appliqué au câble.

Le produit de colmatage a donc été adapté à une reprise des efforts tangentiels et des technologies ont été développées pour les selles et les attaches de suspentes.

Quelques suspensions ont été réalisées avec cette technologie.

Dispositions géométriques des câbles

Sauf sur quelques passerelles légères, les câbles élémentaires, même de gros diamètre, ont une section insuffisante pour supporter les efforts. Les câbles porteurs sont donc généralement constitués de plusieurs câbles élémentaires.

Un câble élémentaire unique est déconseillé dans la mesure où sa rupture entraîne généralement la ruine de l'ouvrage. Cependant, dans le cas où les attaches de suspentes supportent la disparition d'un câble élémentaire, la rupture du premier câble n'entraîne pas obligatoirement la rupture du ou des suivants.

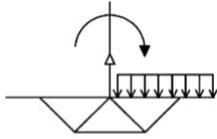
Les torons élémentaires sont organisés en nappes en couronne ou en faisceaux.

Suspension centrale ou suspensions latérales ?

Comme dans le cas des structures haubanées, il est possible d'envisager une suspension centrale ou des suspensions latérales.

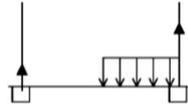
La suspension centrale n'est envisageable que si le tablier comporte un terre-plein central permettant d'implanter les attaches basses de suspentes et si celui-ci présente une rigidité de torsion suffisante pour ramener aux appuis les moments liés à des chargements dissymétriques transversalement. Cette option, récemment utilisée sur le pont du Chavanon de l'A89, impose donc pratiquement un tablier en caisson.

Deux suspensions latérales permettent d'utiliser un tablier sans rigidité de torsion propre. Les dissymétries transversales se traduisent alors par des différences de chargement des deux suspensions. Les tabliers sont alors des structures à poutres de rigidité et pièces de pont.



Chargement dissymétrique

Le tablier doit être rigide en torsion. On utilise donc un profil fermé de type caisson.



Chargement dissymétrique

Les effets de torsion sont repris par le différentiel de charge des deux suspensions latérales.

Disposition des torons élémentaires en faisceau

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

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



Figure 5.12 : Faisceau de 7 torons

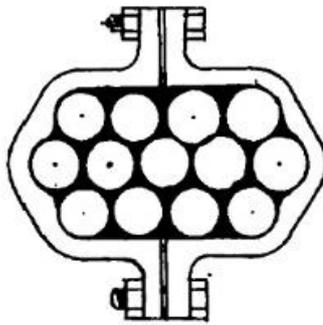


Figure 5.13 : Faisceau de 13 torons

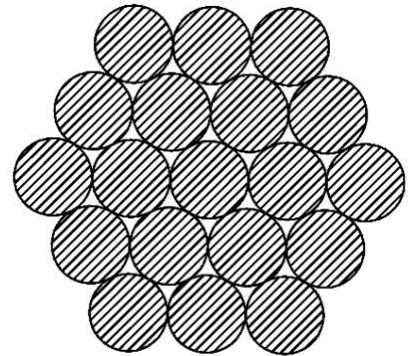
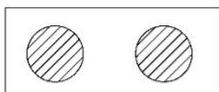


Figure 5.14 : Faisceau hexagonal de 19 torons

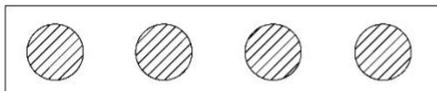
Disposition des torons élémentaires en nappe

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

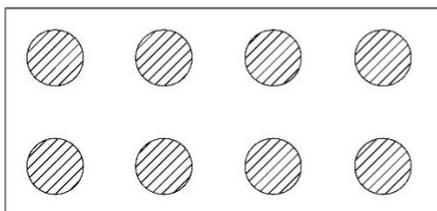
Nappe de 2 torons élémentaires



Nappe horizontale de 4 torons élémentaires



Câble de 8 torons élémentaires disposés en 2 nappes



Figures 5.15 à 5.17 : Différentes dispositions des torons d'un câble



Figure 5.18 : Nappe de deux câbles



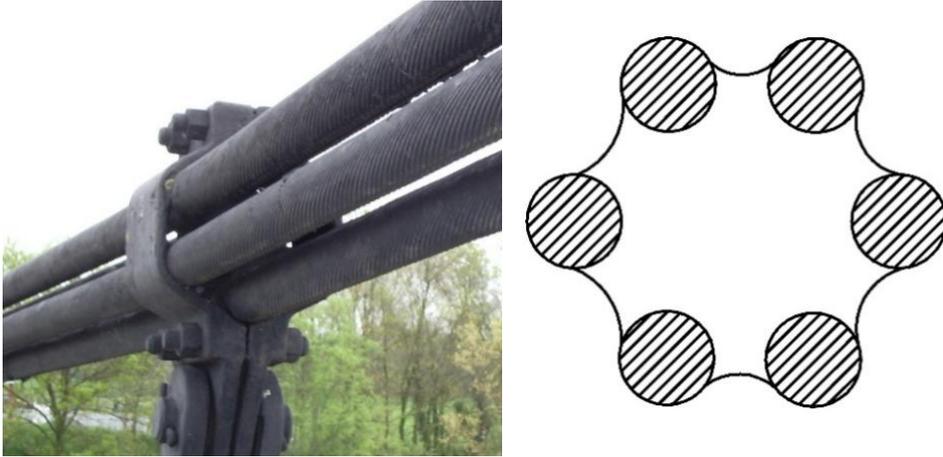
Figure 5.19 : Nappe de six câbles

Cette option est généralement limitée à un faible nombre de torons élémentaires et réservée aux ouvrages de portée modeste mais on trouve aussi des contre-exemples. Ainsi le pont du Teil possède des câbles constitués de 16 torons élémentaires disposés en nappes.

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

Disposition des torons élémentaires en couronne

Les torons élémentaires sont disposés en couronnes autour de noyaux écarteurs sur lesquels ils sont serrés par les attaches de suspentes. Si les torons élémentaires sont bien ventilés, ils sont souvent trop serrés pour permettre une bonne inspection visuelle et leur remise en peinture. La complexité des attaches hautes de suspentes crée des points singuliers au même titre que les selles organes de déviation et épanouissement.



Figures 5.20 et 5.21 : Disposition des torons élémentaires en couronne

Problème du remplacement d'un câble porteur toron par toron

Pour les ponts suspendus, la durée de vie des câbles porteurs est un problème fondamental qui dépend d'une combinaison complexe de différents paramètres : structure des câbles, conception géométrique des selles, des attaches de suspension et des culots, conception de la protection anti-corrosion et maintenance de l'ouvrage.

Il est donc régulièrement conseillé de prévoir le remplacement de la suspension dès l'élaboration du projet initial ou lors de l'élaboration d'un projet de changement de suspension. Si ce conseil est rarement mis totalement en pratique, parce qu'il entraîne des contraintes de conception très lourdes, il reste néanmoins raisonnable de vérifier lors de l'élaboration d'un projet que les dispositions envisagées sont compatibles avec la possibilité d'un remplacement ultérieur des câbles porteurs.

Une solution envisagée pour atteindre cet objectif est de prévoir des câbles porteurs pour lesquels il est possible de changer les torons élémentaires un par un. Arnodin prévoyait ainsi des câbles modulaires où chaque élément constitutif pouvait être théoriquement changé individuellement (l'examen détaillé des assemblages conduit néanmoins à se poser des questions sur la possibilité d'effectuer certains remplacements dans les conditions de sécurité que l'on exige aujourd'hui).

Des suspensions neuves ont été conçues sur ce principe lors de remplacements de câbles porteurs. Les câbles élémentaires sont disposés en nappes de deux superposées et les selles d'appui et attaches de suspentes sont conçues de manière à ce que l'on puisse désolidariser n'importe quel toron élémentaire et le remplacer en maintenant les autres torons en charge. Dans le cas d'une travée suspendue avec de simples câbles de retenue, le remplacement des torons de la nappe supérieure est assez simple ; par contre, la cinématique de remplacement des torons inférieurs exige des déplacements transversaux de câbles élémentaires qui rendent l'opération plus complexe. Les attaches de suspentes vont tourner si l'on déséquilibre les nappes par enlèvement d'un toron (cette rotation, si elle n'a pas été prévue lors de la conception des attaches de suspentes, doit être compensée par des éléments provisoires). Lors du remplacement, le toron ne devant pas glisser sur la selle, il est nécessaire d'équilibrer les tractions de part et d'autre des selles par des mouvements de culots au niveau des ancrages. L'opération de changement des câbles porteurs reste donc complexe et liée à la conception détaillée des pièces concernées et à la procédure de changement elle-même.

Câbles à fils parallèles modernes

Dans le cas des ponts suspendus de grande portée, la longueur des câbles (et donc des torons élémentaires constituant le faisceau) limite la possibilité de transport des torons. Les câbles élémentaires de 72 mm de diamètre ayant servi à la fabrication de la suspension initiale du pont de Tancarville avaient une longueur de 1070 m et un poids de 26,5 t (travée centrale de 608 m). La taille et le poids des bobines de transport des torons élémentaires constituent donc un facteur limitant pour l'utilisation des câbles porteurs en faisceau de torons élémentaires. Il semble que cette technique se soit surtout développée en

France. Dans le cas des grandes et très grandes portées, on utilise donc dans le monde entier des câbles à fils parallèles qui sont, les descendants des câbles à fils parallèles du type de ceux utilisés par les frères Seguin utilisés dans les ponts suspendus de la première génération. Ces câbles sont directement « tissés en place » avant d'être compactés et enveloppés par un fil enroulé sous tension (le wrapping). On trouve ensuite des couches de protection externes et éventuellement une déshumidification. La technologie de fabrication de ces câbles est maintenant très aboutie et complètement maîtrisée.

On peut reprocher à cette technique la difficulté d'effectuer un examen visuel permettant d'obtenir des indices sur l'état des câbles. Ceci peut être compensé par un démontage périodique (tous les 20 ou 30 ans par exemple) des couches de protection et du wrapping entre deux suspentes et sous un collier. L'introduction de coins en bois permet alors d'écarter les fils constitutifs et de les examiner visuellement sur une certaine profondeur.

Dans les câbles à fils parallèles, le contact inter filaire étant linéaire et beaucoup moins contraint, les micro déplacements entre fils sont pratiquement nuls, ce qui diminue nettement le risque d'endommagement par fretting-fatigue.

Comportement d'un câble toronné sous l'effet d'un effort de traction et de variations de température

Si l'on soumet le câble neuf, c'est-à-dire sortant de l'usine, à un premier cycle de traction, le câble présente un module de déformation global E0.

Si l'on soumet ensuite ce même câble à des cycles successifs de traction, son module croit en fonction du nombre de cycles et tend à se stabiliser à une valeur Eu, la différence entre E0 et Eu pouvant atteindre 20 %. Cette variation de module correspond surtout à une mise en place des fils constitutifs et s'accompagne d'un allongement rémanent.

Ce comportement n'est pas absolument identique d'un câble à l'autre et peut ne pas être absolument constant sur la longueur du même câble à cause des défauts locaux.

Le réglage en géométrie de la structure est compliqué par cette méconnaissance du module exact des câbles. La géométrie des câbles étant figée alors que ceux-ci sont encore faiblement chargés, l'hétérogénéité des modules provoque des différences entre les efforts de traction dans les câbles élémentaires à la fin de la construction. Ces phénomènes peuvent en outre encore s'amplifier après la mise en service, le module pouvant encore évoluer avec les cycles de chargement.

Le tableau ci-dessous, extrait de la norme NF EN 1993-1-11, donne la valeur du module d'élasticité à retenir pour les charges variables en fonction du type de câble et de la nature du fil.

Câble à haute résistance	Eq en kN/mm ² (*)	
	Fils en acier	Fils en acier inoxydable
Torons hélicoïdaux	150 ± 10	130 ± 10
Câbles clos	160 ± 10	-
Câbles métalliques toronnés à âme (CWR)	100 ± 10	900 ± 10
Câbles métalliques toronnés avec fils continus (CF)	80 ± 10	-
Faisceau de fils parallèles	205 ± 5	-
Faisceau de torons parallèles	195 ± 5	-

(*) Les valeurs estimées s'appliquent à un chargement cyclique compris entre 30 % et 40 % de la résistance à la rupture calculée F_{uk} .

Ces variations du module des câbles montrent qu'il est très utile de procéder à une mise en tension préalable en atelier avant transport sur le site. Cette opération permet aussi de disposer des repères géométriques concernant les axes des selles, les attaches des suspentes. Même si une partie de la stabilisation du module est perdue lors des opérations de bobinage et débobinage nécessaires au transport, les repères géométriques ont été placés sur les bonnes longueurs de câbles aux bonnes valeurs de contraintes.

Selles d'appui, sellettes de déviation et colliers d'épanouissement

Le poids du tablier et une partie des charges d'exploitation sont repris par les câbles porteurs qui s'appuient sur des selles sur pylônes et sellettes de déviation. Ces organes ont pour rôle principal de transmettre des charges du câble aux appuis (verticales sur les pylônes et le plus souvent inclinées pour les sellettes d'appui). La compatibilité des déplacements verticaux des câbles porteurs et des tabliers impose de situer les appuis des câbles à des positions proches de la verticale des appuis du tablier. Ces pièces d'appui des câbles étant vitales pour la structure, leur stabilité au vent et au risque d'échappement d'appui est à vérifier avec soin.

Les colliers d'épanouissement assurent la transition entre les zones courantes des câbles porteurs et la zone d'ancrage où les câbles élémentaires s'écartent vers leurs ancrages individuels (culots et barres d'ancrage). Cette fonction peut être couplée à une déviation du câble.

Les chargements du tablier, qui modifient la contrainte dans les câbles porteurs, et les charges thermiques entraînent des variations de longueur des câbles et donc des déplacements des selles et sellettes d'appui. Les déplacements verticaux lors du passage des charges mobiles conduisent à des variations angulaires à la sortie des zones d'appui.

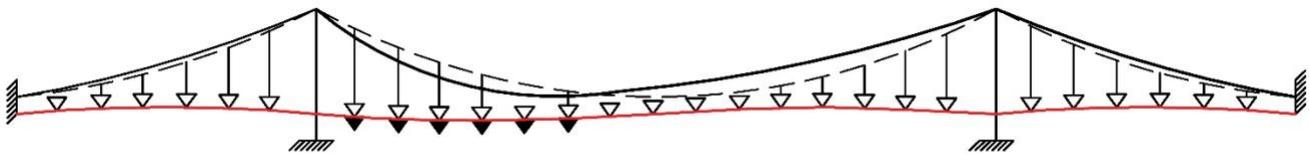


Figure 5.22 : Schéma des déformations d'un pont à trois travées suspendues

Selles d'appui sur pylône

Conception géométrique

La conception géométrique des organes de déviation est en grande partie liée au rayon de courbure de déformation du câble que l'on admet.

Dans le cours de M. Grelot de 1956, on conseille de limiter, pour les câbles toronnés, le diamètre D de courbure du câble moyen à une valeur minimale de l'ordre de 500 fois le diamètre des fils constitutifs.

Dans le fascicule 61 titre V du CCTG, le rayon de courbure est limité à trente fois le diamètre du câble toronné.

La partie 1.11 de l'Eurocode 3 indique que le rayon de la selle ne doit pas être inférieur à 30 fois le diamètre du toron, valeur qui peut être réduite à 20 fois si l'appui du câble sur au moins 60 % de son diamètre est recouvert d'un revêtement en métal mou ou d'un revêtement par projection de zinc sur une épaisseur minimale de 1 mm. Cette valeur est aussi limitée à 400 fois le diamètre du fil.

Les dispositions géométriques envisagées insistent sur des longueurs d'enroulement de sécurité et des congés en bord de zone d'appui disposés pour que le câble ne puisse jamais se mettre en appui sur une arête vive. On constate en effet fréquemment des endommagements de câbles dus à de mauvaises dispositions géométriques concernant ces points particuliers.

L'absence de glissement des câbles sur la selle est aussi une contrainte absolue, ce glissement étant naturellement empêché par le frottement câble sur selle.

Dans son cours de 1956, M. Grelot propose un coefficient de frottement de 0,1 à utiliser avec un coefficient de sécurité de 3.

Le fascicule 61 titre V du CCTG propose des coefficients de 0,13 entre fils ou entre câbles et de 0,15 entre fils ou câbles et pièces d'appui.

Les pressions linéiques d'appui des torons entre eux et des torons sur la selle sont aussi à contrôler.

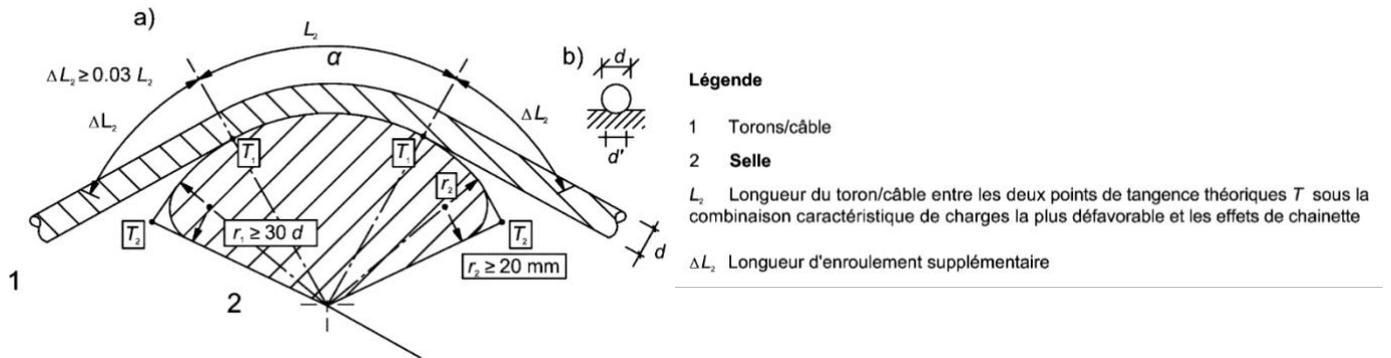
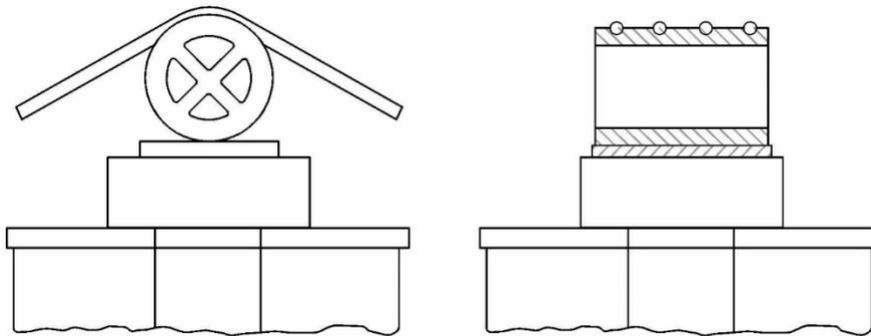


Figure 5.23 : Contraintes géométriques de conception selon l'Eurocode 3



Figures 5.24 et 5.25 : Selles d'appui en rouleaux

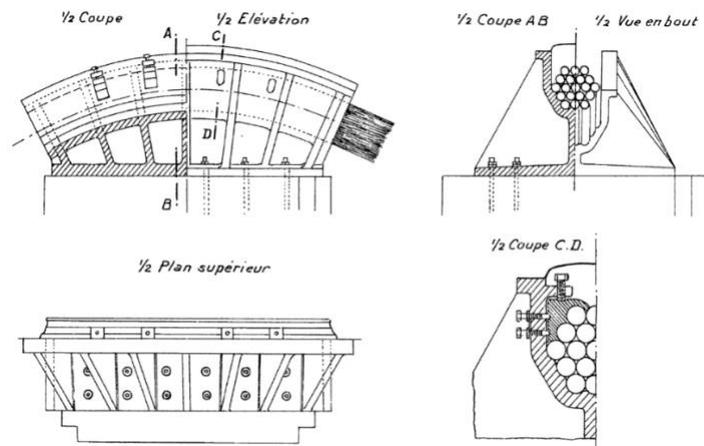
Dans les premiers ponts suspendus à câbles à fils parallèles, on utilisait de simples rouleaux comme appuis des câbles. La fonction de déplacement longitudinal était directement assurée et durable. Les rayons de courbure étaient très courts et cette disposition n'était acceptable que parce qu'elle était utilisée avec des câbles à fils parallèles de petit diamètre. Même avec ces câbles, on constatait une grande déformation de la section transversale du câble au passage sur le rouleau. Dans le cas où les câbles à fils parallèles ont été remplacés par des câbles toronnés de section équivalente sans remplacement des rouleaux par des selles à grand rayon, on constate un net écartement des fils en fibre supérieure propice à la pénétration d'eau. La courbure imposée au câble est beaucoup trop faible et elle réduit nettement sa capacité en traction.



Figures 5.26 et 5.27 : Selles d'appui en rouleaux

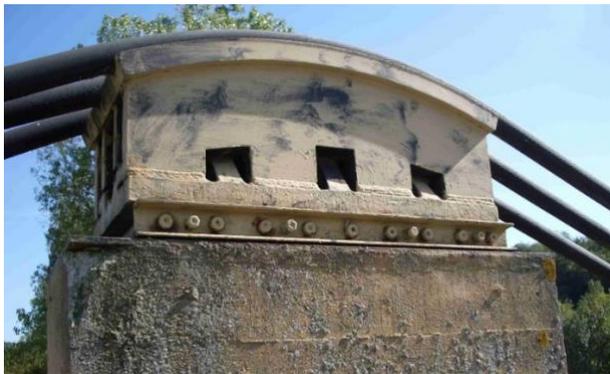
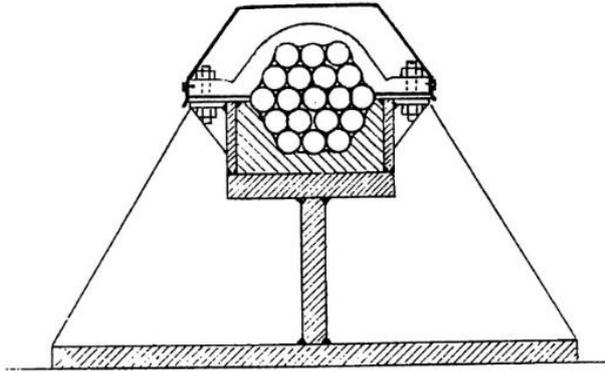
Selles modernes à grand rayon

Ces selles ne diminuent pas la capacité du câble si elles sont correctement conçues : en effet, le câble ne vient jamais en appui sur un point anguleux et les rayons sont suffisants dans la zone d'appui. Les selles étaient initialement des pièces moulées, la zone d'appui du câble pouvant être l'objet d'un usinage complémentaire. Dans les réalisations modernes, seul l'appui des câbles est parfois une pièce moulée complétée par un usinage de la zone d'appui des câbles, la partie inférieure (platine, âme et raidisseurs radiaux) étant mécano-soudée.



Figures 5.28 à 5.31 : Selles modernes à grand rayon

Dans ce cas, seul l'appui de câble est une pièce moulée. Toute la structure de la selle est mécano-soudée.

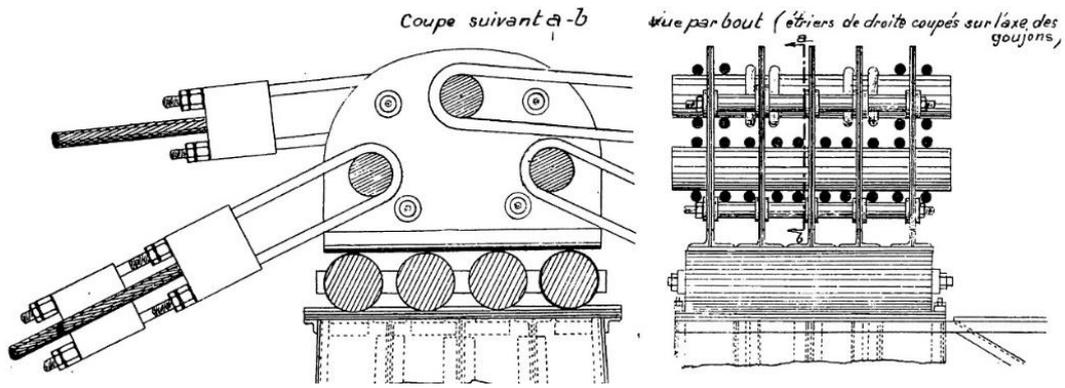


Figures 5.32 à 5.35 : Selles modernes à grand rayon

Appuis avec interruption des câbles

Pour les petits ouvrages ou passerelles pour piétons pour lesquels les sections des fûts de pylônes peuvent être assez faibles, ces contraintes de conception peuvent conduire à des selles d'appui exagérément longues. Des solutions plus compactes peuvent être recherchées en interrompant les câbles au niveau des selles d'appui. Les câbles sont alors terminés par des culots d'ancrage fixés sur des étriers appuyés sur des axes horizontaux transversaux.

Dans le cas de ponts suspendus à travées multiples, tabliers légers et câbles de tête, les déséquilibres de traction pouvant apparaître sur une même famille de câbles (câbles porteurs et câbles de tête quand on charge une travée sans charger la voisine) interdisent généralement l'utilisation du simple frottement pour empêcher le glissement du câble. Les câbles sont alors interrompus au niveau des pièces d'appui sur les pylônes et sont alors ancrés sur des chariots avec des culots, étriers et axes.

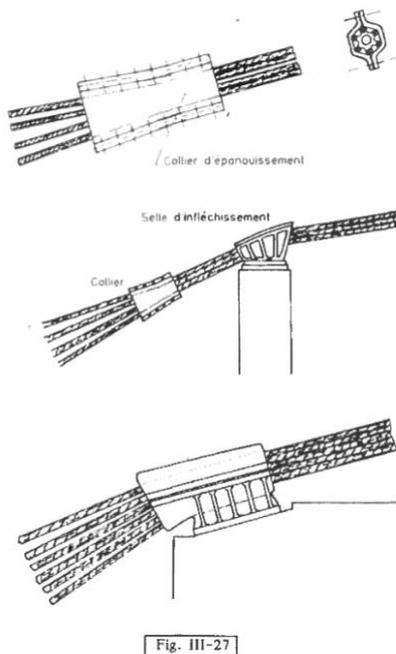


Figures 5.36 à 5.39 : Câbles interrompus au droit des pylônes

Cette discontinuité des tractions de part et d'autre d'un appui peut aussi être gérée avec un câble continu passant sur une selle. On appliquait un couple de torsion sur le câble qui créait une augmentation locale du diamètre que l'on bloquait dans une boîte remplie avec du zinc en fusion et bloquée sur la selle. On parle alors de « câble à bosse ».

Sellettes d'appui et épanouissement des torons élémentaires

À proximité des ancrages, on trouve plusieurs dispositions possibles concernant les sellettes de déviation des câbles et les colliers d'épanouissement.



Simple collier d'épanouissement (câbles de retenue)

Selle d'infléchissement et collier d'épanouissement

Selle d'appui et d'épanouissement

Fig. III-27

Figures 5.40 à 5.42 : Câbles interrompus au droit des pylônes

Structure d'un collier d'épanouissement

Les efforts centrifuges dus aux poussées au vide induites par la déviation des câbles peuvent être intenses. 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 également à étudier avec soin avant toute ouverture.



Figures 5.43 à 5.45 : Détails de divers colliers d'épanouissement

Dispositions relatives aux déplacements des appuis de câbles

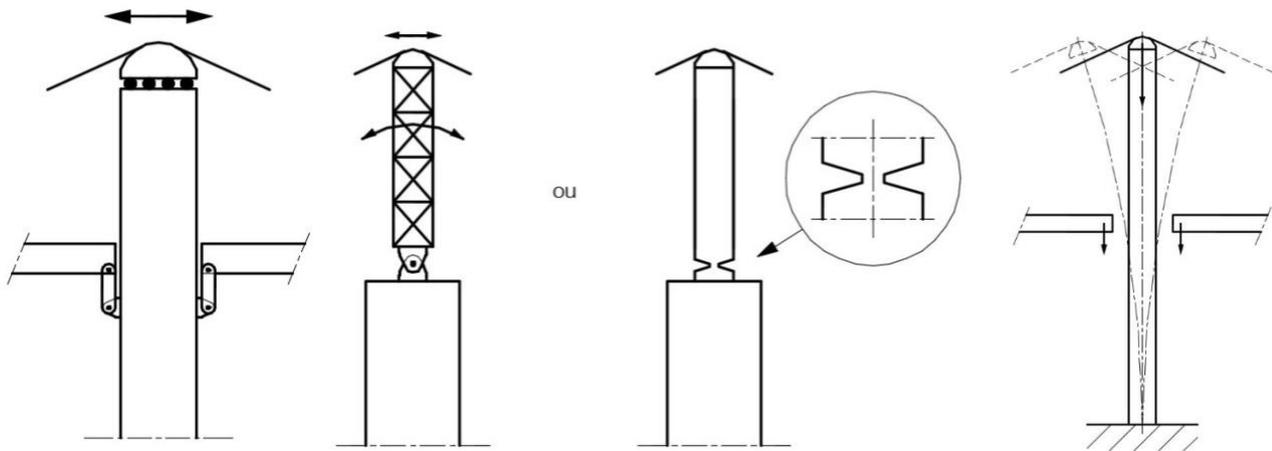
Comme indiqué plus haut, les variations de longueur des câbles dues aux variations de charges et aux effets thermiques imposent des déplacements longitudinaux des appuis des câbles. Les déplacements transversaux doivent donc être empêchés car un échappement transversal, du par exemple aux effets du vent, provoquerait la ruine de l'ouvrage.

Les selles d'appui sur pylônes peuvent se déplacer longitudinalement en utilisant l'un des principes suivants. :

- déplacement de la selle sur un pylône encastré en pied ;
- articulation en pied de pylône (grain d'appui ou axes et chapes pour les pylônes métalliques et articulation Freyssinet pour les pylônes en béton). La selle est alors fixe en tête de pylône ;
- utilisation de la souplesse des pylônes. La selle est alors fixe en tête de pylône.

Ces dispositions, quand elles fonctionnent normalement, introduisent des efforts horizontaux de l'ordre de quelques pour cent de l'effort d'appui. Les déplacements de selles nécessaires à la construction de l'ouvrage (ou à un changement de suspension) sont généralement beaucoup plus importants que les déplacements en service. Il est donc courant que le principe de déplacement utilisé pour la construction soit différent de celui utilisé pour le fonctionnement en service de l'ouvrage. Lors de la construction des ponts de Tancarville et d'Aquitaine, les selles étaient mobiles sur rouleaux mais elles ont été fixées en tête de pylône à la fin de la construction, les mouvements dus au service normal de l'ouvrage étant assurés par la seule souplesse des pylônes.

Déplacements des selles sur pylônes



Figures 5.46 à 5.49 : Différentes solutions permettant le déplacement longitudinal des câbles en tête de pylône

Comme le montrent les schémas précédents, ces déplacements étaient traditionnellement assurés par des appuis à rouleaux pleins en acier. L'expérience montre toutefois que ces appuis sont très souvent bloqués. Ces systèmes étant très rigides, les charges ne sont donc pas distribuées de manière homogène entre les rouleaux, les contraintes de contact entre les rouleaux les plus chargés et les platines deviennent trop intenses et le système se grippe. Les articulations de pied des pylônes métalliques réalisés avec des axes et des chapes sont aussi très régulièrement grippées. Une fois les mouvements initialement prévus empêchés, ces déplacements étant inéluctables, ils doivent se produire d'une autre manière. Si la souplesse des appuis est suffisante, celle-ci prend le relais, mais si les appuis sont rigides (par exemple en cas de pilettes massives), des fractures consécutives au chargement horizontal des appuis peuvent survenir.

Dans les conceptions plus modernes, on trouve les solutions suivantes :

- appuis à rouleaux : dans les appuis modernes, 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 également munie de jupes en caoutchouc qui évitent la pollution de la zone de roulement. On ne bénéficie toutefois 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, c'est-à-dire quand les charges sont modérées et les déplacements limités, cette option peut constituer une solution 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, et l'utilisation systématique de butées de sécurité longitudinales et transversales est recommandée.

Déplacements des sellettes de déviation

Les solutions sont identiques mais ces organes se trouvant à proximité des ancrages, les déplacements sont beaucoup plus faibles et ces pièces sont souvent posées sur des parties massives très rigides.

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

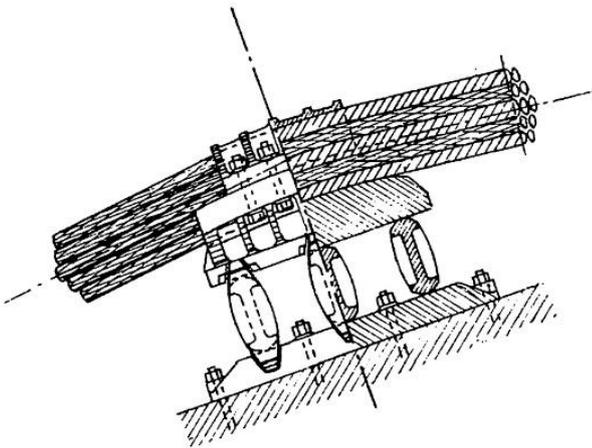
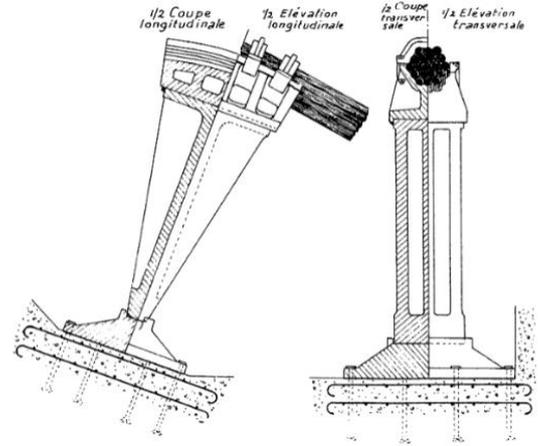


Figure 5.50 : Appui sur rouleaux

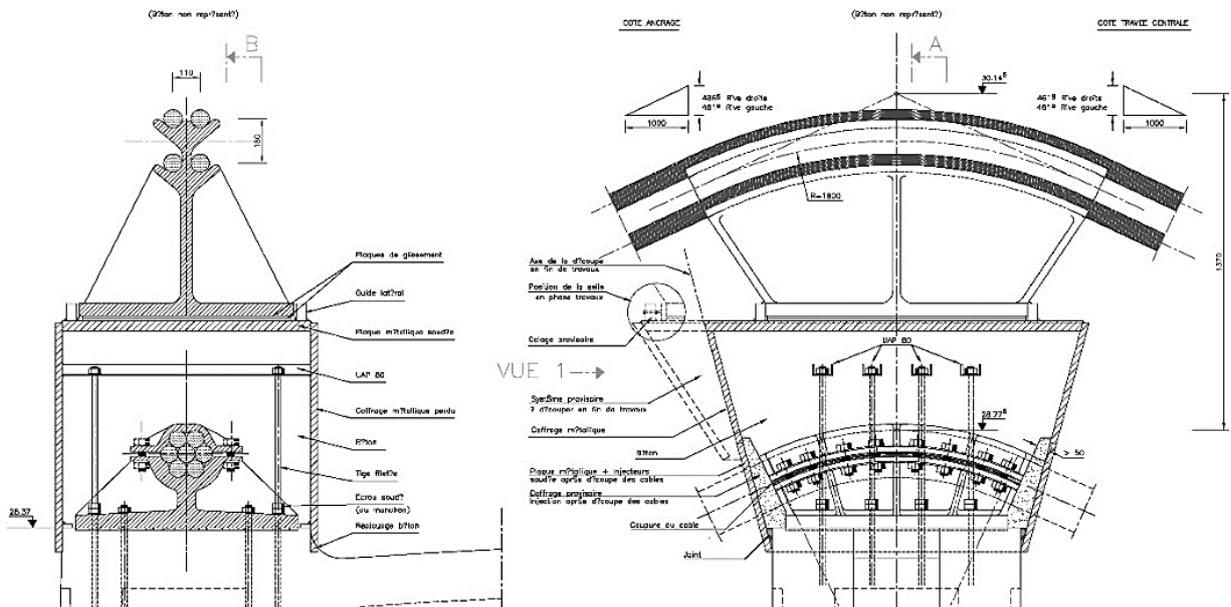


Figures 5.51 et 5.52 : Appui sur une béquille articulée en pied

Dans les grands ouvrages modernes, le glissement des selles d'infléchissement est de type inox sur téflon.

Problème du remplacement d'un câble porteur toron par toron

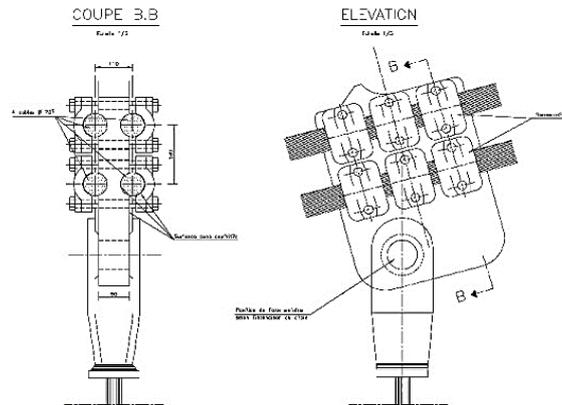
L'intérêt de simplifier le remplacement des câbles porteurs est évident. Sur quelques changements de suspensions, on a essayé d'apporter une réponse à cette préoccupation en adoptant les dispositions suivantes.



Figures 5.53 et 5.54 : Dispositions favorisant le remplacement d'un câble toron par toron

L'idée est de pouvoir changer les torons un par un. Les selles et les attaches de suspentes permettent bien de remplacer les torons individuellement mais les cinématiques de remplacement sont complexes pour les torons inférieurs. Leur remplacement impose en effet un déplacement transversal pour éviter les torons supérieurs et leurs attaches en plus des déplacements verticaux. Il faut effectuer des corrections de position des ancrages lors de la détention et la rétention du toron afin d'éviter les glissements sur les selles. Dans le cas de quatre torons, l'enlèvement de l'un d'entre eux provoque une augmentation de 1/3 de la charge des torons restants. Est-ce admissible avec des câbles déjà endommagés ?

L'effet de la détention puis de la rétention d'un toron élémentaire sur l'équilibre des selles et les sollicitations dans les fûts de pylônes doit lui aussi être examiné et très probablement compensé par des mouvements d'ancrages des torons concernés.



Figures 5.55 et 5.56 : Dispositions de suspentes nécessaires au remplacement d'un câble toron par toron

La détention d'un toron élémentaire entraînant le déversement des nappes de câbles, les articulations des suspentes sur leurs attaches doivent permettre les rotations correspondantes.

Dans son principe, la méthode de remplacement câble par câble consiste :

- à libérer de tous ses colliers, des selles d'appui et de ses ancrages un des câbles de la suspension, à le démonter et à l'évacuer (utilisation de blocages sur selles, de suspentes provisoires et de déplacements d'ancrages) ;
- à mettre en place un nouveau câble, bloqué au moins provisoirement sur ses selles d'inflexion ;
- à l'aide d'un système de vérins et d'attaches provisoires, à mettre en place le nouveau câble dans les colliers de l'ancien. Simultanément, à mettre en tension ce câble, côté retenue, de manière à égaliser les tensions de part et d'autre du pylône et à éviter tout dérapage des selles d'inflexions (ou tout effort de torsion dans le cas de pylônes articulés à leur base) ;
- à recommencer la même opération pour tous les autres câbles de la suspension ;
- à procéder à un réglage des tensions des suspentes et des câbles de retenue.

Cette méthode n'est utilisable que dans les conditions suivantes :

- il faut que la géométrie du faisceau existant permette de libérer un câble sur toute sa longueur, sans avoir à ne toucher à aucun des autres ;
- il faut que le nombre de câbles soit suffisant pour que le poids propre de l'ouvrage puisse continuer à être supporté par une nappe réduite d'une unité, et cela compte tenu de l'état éventuel d'oxydation de cette nappe.

La méthode présente les avantages et les inconvénients suivants :

- avantages : la méthode est relativement simple à mettre en œuvre et n'exige pas la fourniture de nouvelles selles et de nouveaux colliers. Elle permet de maintenir rigoureusement constante la géométrie du faisceau de câbles ;
- inconvénients : elle ne peut s'appliquer, comme il vient d'être dit, qu'à certains types d'ouvrages et exige que le nombre de câbles par nappe soit suffisant pour que l'on puisse en démonter un sans risque.

Le fait de libérer un câble provoque un déversement de la nappe correspondante, ce qui implique que les suspentes soient parfaitement articulées et qui complique la mise en place du nouveau câble.

Enfin, la méthode impose que soient réalisés simultanément la mise en tension des câbles de retenue par vérins et les transferts de charges, ce qui peut s'avérer délicat.

Une alternative, ou un complément, consiste à établir le projet de remplacement de la suspension dès la première mise en place ou lors du changement des câbles porteurs. Les dispositions sont alors optimisées afin de rendre le remplacement ultérieur le plus simple possible.

Les suspentes

Fonctionnalités et paramètres de conception

Les suspentes servent à remonter les charges du tablier, poids propre et charges d'exploitation, sur le câble porteur. Leur attache supérieure ne doit pas glisser sur celui-ci malgré sa pente. Les suspentes sont aussi dimensionnées pour le cas de charge de démontage d'une suspente et le cas accidentel de rupture d'une suspente. Dans ce dernier cas, les charges étant alors brutalement reportées sur les suspentes voisines avec un effet dynamique, la surcharge correspondante ne doit pas entraîner de rupture d'une suspente proche. Dans le cas contraire, les ruptures successives de proche en proche conduiraient à la ruine de l'ouvrage.

Les charges thermiques et certaines charges d'exploitation du tablier créent des déplacements longitudinaux relatifs du tablier et des câbles porteurs. Ces effets s'ajoutent aux légères rotations du tablier et des câbles porteurs au niveau des points d'attache. Les suspentes doivent donc être articulées dans le sens longitudinal. Les charges transversales, principalement dues au vent, créent aussi des rotations dans le sens transversal mais les valeurs sont généralement nettement plus faibles.

Si ces déplacements sont empêchés par la conception des attaches, ils vont entraîner une flexion des suspentes qui est d'autant plus intense que les suspentes sont rigides et les barres courtes (bas de parabole des câbles porteurs). Dans le cas de fixations avec des axes et des chapes, celles-ci permettent un bon alignement lors du montage et de la mise en charge mais une fois la suspente chargée, leurs frottements bloquent la rotation. Ces préoccupations ont conduit à ajouter des rotules sur les attaches hautes des suspentes courtes lors du remplacement de la suspension du pont d'Aquitaine. On trouve des méthodes analytiques pour quantifier ces effets dans « Haubans-Recommandations de la commission interministérielle de la précontrainte ».

La technologie des attaches dépend du matériau de la suspente et de la structure du câble porteur. Les concepteurs ont été très imaginatifs sur ce sujet et on peut rencontrer de très nombreuses dispositions différentes. Leur efficacité est surtout liée aux degrés de liberté permis et à la prise en compte des préoccupations de durabilité (zones de rétention d'eau, d'accumulation de souillures etc.).

Matériaux

Dans les ponts de la première génération, on trouve des suspentes en fer forgé.

À partir de la fin du XIX^e siècle, on a utilisé des barres en acier dit mi-dur dont les caractéristiques mécaniques générales sont proches de celles d'un acier de nuance S355 moderne. Par contre, leurs ductilités et résiliences sont très variables jusqu'à une période assez récente. Ces barres sont munies à leurs extrémités de filets taillés plus propices que des filetages roulés à une rupture fragile, à l'apparition de fissures de fatigue et à une corrosion localisée en fond de filets.

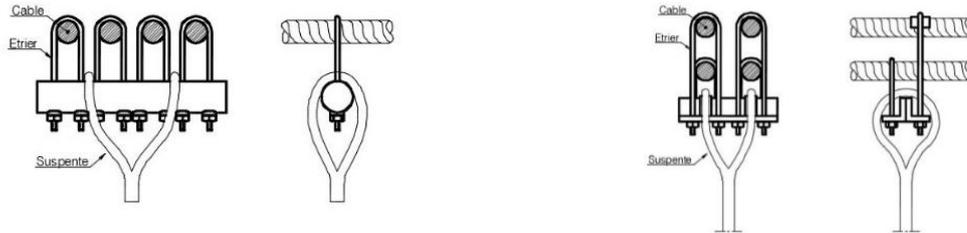
On utilise actuellement des barres en acier S355K2 ou des câbles suivant la puissance nécessaire. Dans le cas des barres, les filetages sont aujourd'hui systématiquement roulés c'est-à-dire effectués par moletage sans enlèvement de matière. Les câbles peuvent être revêtus d'une gaine extrudée en PEHD et l'espace entre les fils et la gaine peut être colmaté avec un produit souple.

Dans le cas de suspentes en câbles munies d'un culot en partie haute, il arrive que l'eau percole à travers le culot puis dans le câble, ce qui favorise le développement d'une corrosion interne sous le culot. Celle-ci se traduit généralement par un gonflement du câble dans la zone corrodée.

Attaches supérieures

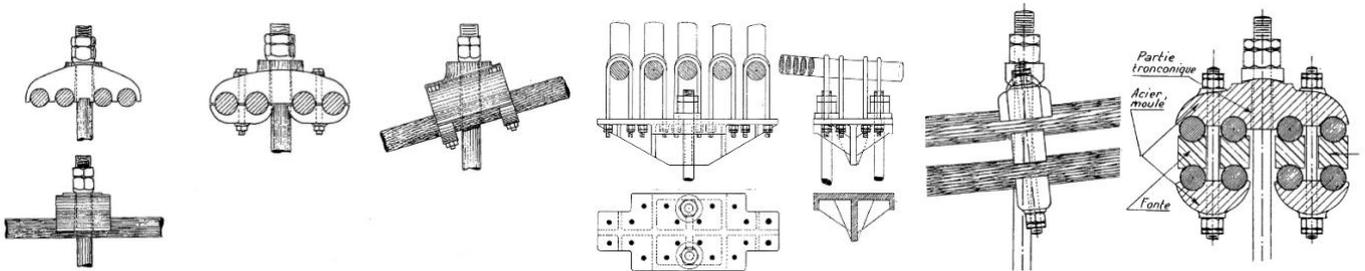
Les attaches supérieures doivent transmettre l'effort vertical sans glisser sur le câble porteur malgré sa pente. La reprise du glissement s'effectue par un serrage à l'aide de boulons qui permet de mobiliser le frottement sur le câble. Cette fonction est souvent mal assurée sur les anciennes attaches, ce qui provoque des glissements et des dérèglages de suspension. Les attaches doivent assurer les rotations nécessaires au bon fonctionnement de la suspente.

Dans le cas des barres en fer forgé, on utilise directement des étriers sur les câbles. L'œil d'extrémité de la barre s'enroule directement sur le chevêtre suspendu aux étriers.



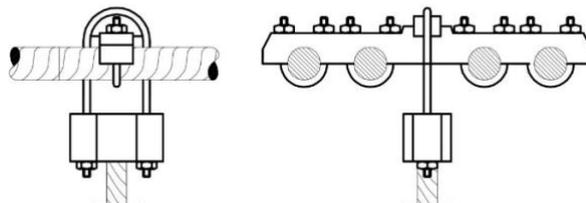
Figures 5.57 à 5.60 : Attaches hautes de suspentes en barres en fer forgé

Dans le cas de suspentes en barres filetées, on trouve de très nombreuses dispositions. Les suivantes ont été utilisées sur des câbles en nappes.



Figures 5.61 à 5.67 : Attaches hautes de suspentes en barres filetées

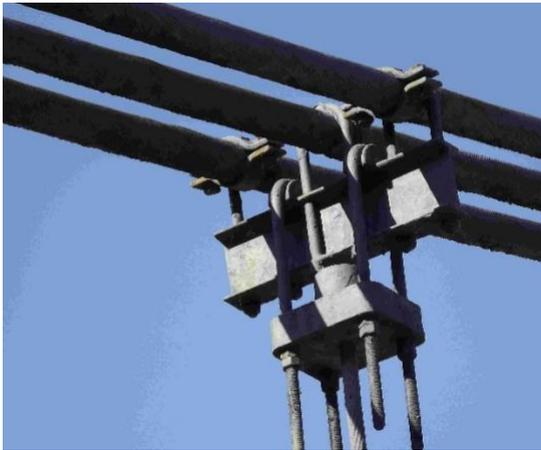
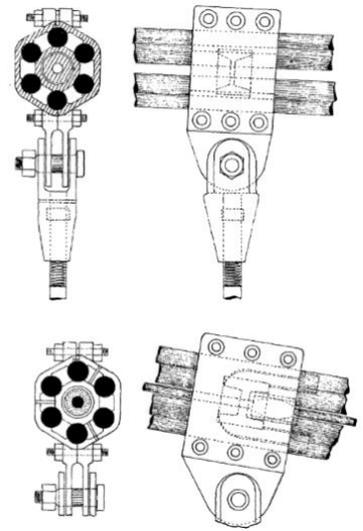
Quand la suspente est en câble, c'est le culot supérieur qui est fixé sur la pièce d'attache.



Figures 5.68 et 5.69 : Attaches hautes de suspentes en câbles

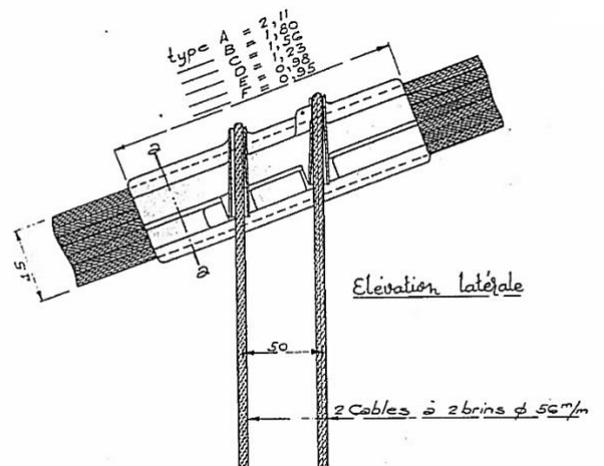
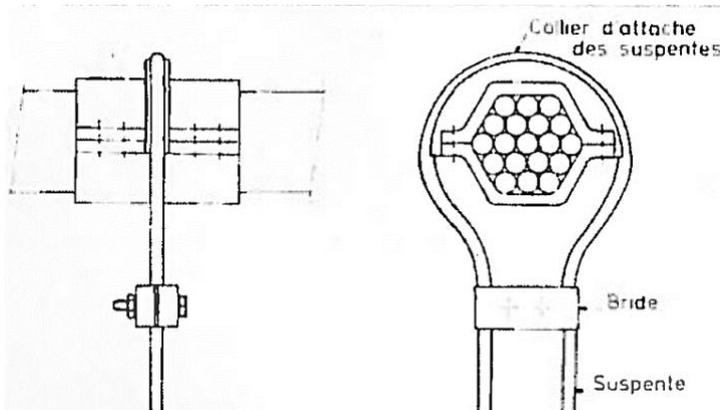
Des rondelles à bosses ou cales oscillantes sont communément utilisées pour assurer les fonctions d'articulation.

Sur les câbles disposés en couronne, les attaches supérieures sont réalisées en serrant les torons élémentaires sur un noyau.



Figures 5.70 à 5.75 : Attaches supérieures de suspentes réalisées par serrage de torons en couronne

Sur les faisceaux de câbles, on séparait traditionnellement les fonctions de frottement (serrage du collier sur le câble) et de transmission de l'effort vertical (appui sur le collier).



Figures 5.76 à 5.78 : Anciennes suspentes du pont d'Aquitaine

On trouve, sur des ouvrages récents, la juxtaposition des deux fonctions (serrage et transmission de l'effort vertical). Ces colliers sont d'un fonctionnement complexe, le serrage provoque une compression radiale dans le faisceau et une traction dans les parties minces du collier. Lors de la mise en traction de la suspente, la reprise de l'effort se partage entre l'effet membranaire dans le collier et la flexion dans la partie inférieure. Ce partage s'effectue en fonction du rapport entre l'effort de serrage et de traction dans la suspente ainsi qu'en fonction de la raideur du faisceau, elle-même fonction du serrage.



Figure 5.79 : Attache supérieure du pont d'Aquitaine

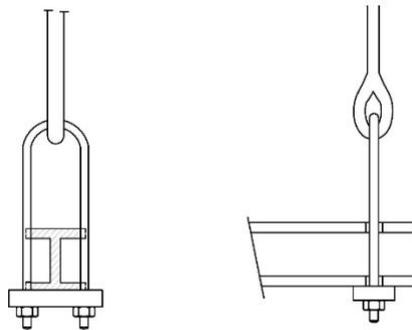


Figure 5.80 : Attache supérieure du pont d'Aquitaine

Une solution plus simple consiste à utiliser des demi-colliers rigides mais cette option est moins efficace en ce qui concerne l'effort de serrage.

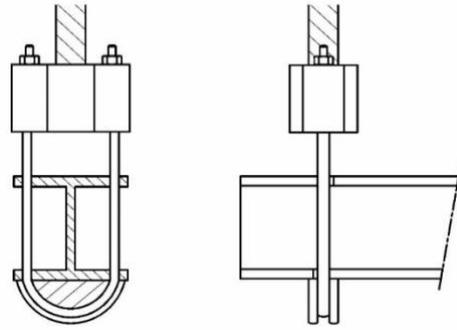
Attaches inférieures

Dans le cas des barres en fer forgé, on trouve traditionnellement la disposition de la figure ci-dessous dans laquelle un étrier est passé dans l'œil d'extrémité de la barre constituant la suspente.



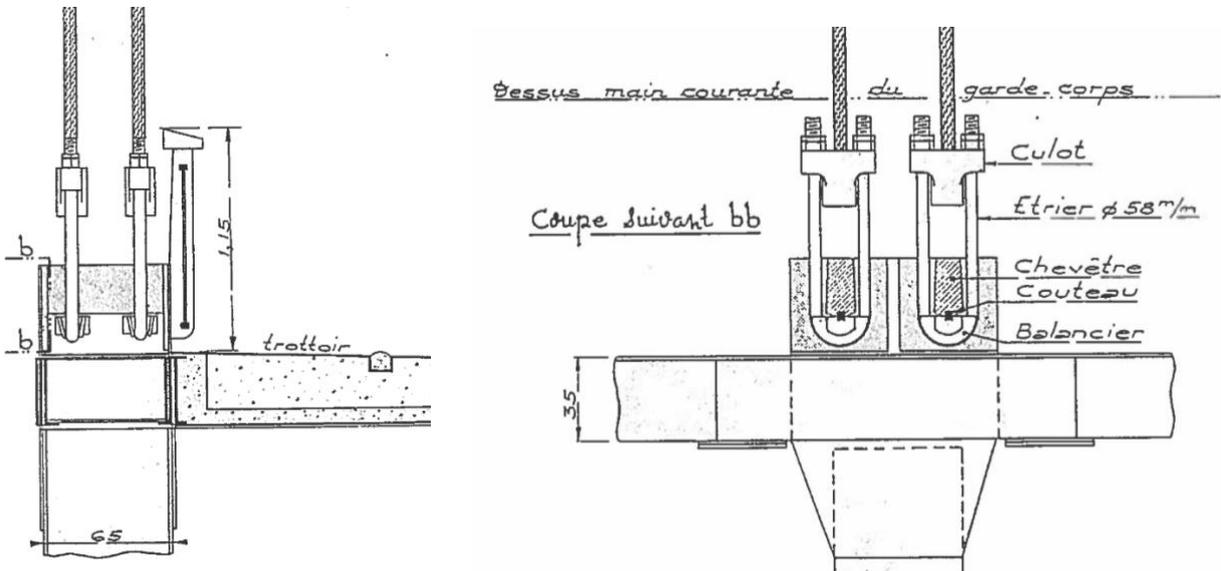
Figures 5.81 et 5.82 : Conception de l'attache inférieure dans le cas de suspentes en barres en fer forgé

La figure ci-après présente une autre conception de l'attache inférieure d'une suspente, avec un étrier appuyé sur une cale hémicylindrique. Une fonction de rotule peut être ajoutée si la cale hémicylindrique est articulée.



Figures 5.83 et 5.84 : Conception d'une attache inférieure de suspenste incluant une cale hémicylindrique

Dans les anciennes suspentes du pont d'Aquitaine, les câbles de suspentes s'enroulaient sur le collier et les culots inférieurs étaient fixés sur des étriers appuyés sur des cales articulées (grain ou couteau d'appui).



Figures 5.85 et 5.86 : Attaches inférieures des anciennes suspentes du pont d'Aquitaine



Figures 5.87 à 5.89 : Autres exemples d'attaches basses de suspentes

Ancrages et organes d'attache des câbles porteurs et suspentes en câbles

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

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

Des culots ou douilles sertis à la presse ont été utilisés dans les ouvrages légers et pour des câbles de petit diamètre mais ces dispositifs ne supportent pas forcément la charge de rupture du câble. Leur efficacité statique dépend du dispositif, du diamètre et de la mise en œuvre. Des rendements (capacité à la rupture de l'attache divisée par la capacité à la rupture du câble) de 0,85 à 0,95 sont le plus souvent évoqués, la capacité de ces dispositifs étant habituellement établie sur la base de campagnes d'essais. Leur endurance est plus faible que celle des culots.

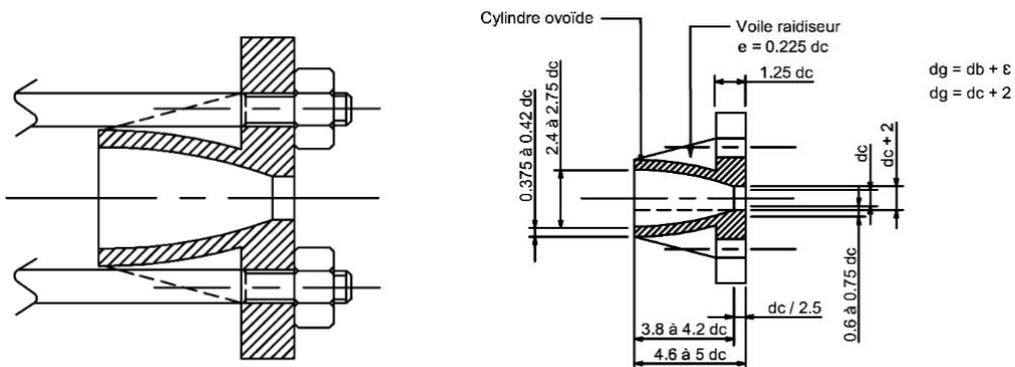
Matériaux

Initialement les culots étaient réalisés en fonte. Ce matériau étant fragile en traction et ayant des capacités de flexion faibles, les oreilles d'accrochage sur les barres présentaient une longueur proche de la longueur totale des culots. Ces culots sont souvent fissurés au niveau des barres d'ancrage ou par le gel en cas d'accumulation d'eau.

Des culots en acier moulé semblent avoir été réalisés en utilisant la géométrie et les moules des culots en fonte. La capacité en traction et donc en flexion des aciers a permis de faire évoluer la géométrie des culots. Les culots modernes sont le plus souvent mécano-soudés en acier de nuance S355 ou en aciers mécaniques de limite élastique plus élevée, leur géométrie étant alors simplifiée afin d'être plus adaptée à ce mode de fabrication.

Géométrie

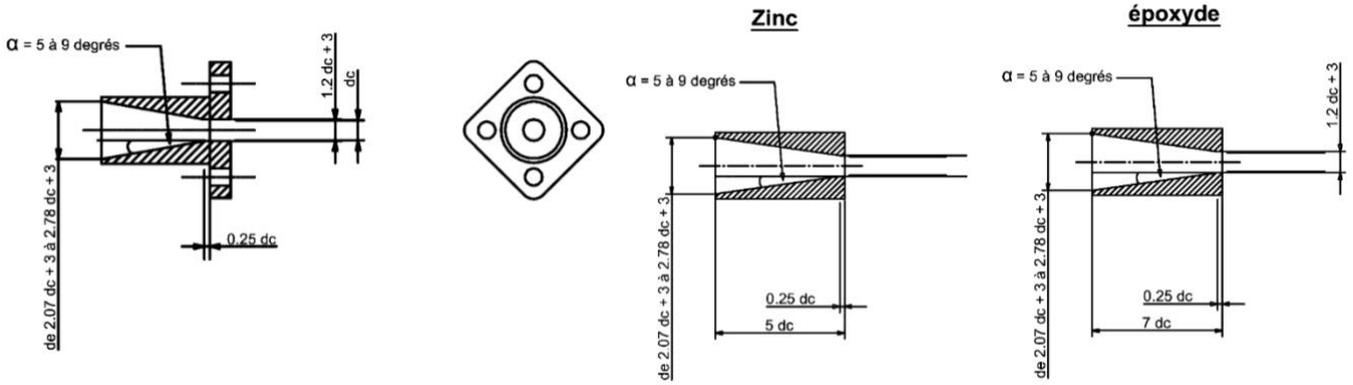
On trouve dans le cours de M. Grelot de 1956 des indications précises sur la conception géométrique de culots en acier moulé, réalisés pour des câbles toronnés en fils de classe 120 à 140.



Figures 5.90 à 5.91 : Géométrie d'anciens culots en acier moulé (dc est le diamètre du câble)

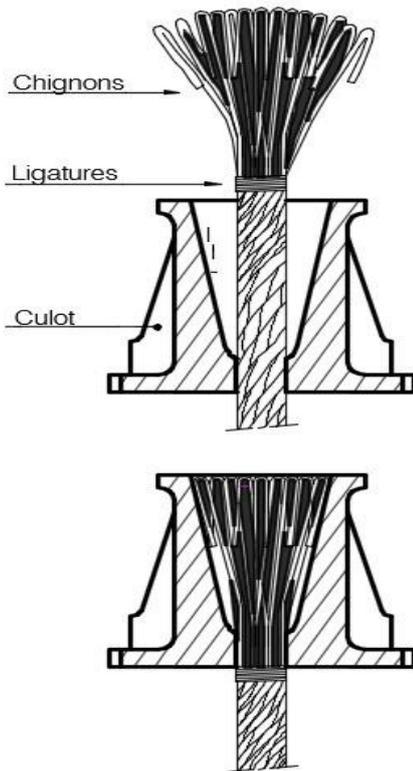
Ces géométries ne sont plus employées sur les culots modernes généralement mécano-soudés. Ces derniers intègrent une plaque de répartition ou un chevêtre qui transmet l'effort de traction aux barres d'ancrage.

Il existe des normes en Allemagne et en Angleterre qui sont couramment utilisées par les constructeurs.



Figures 5.92 à 5.93 : Aspects géométriques des culots mécano-soudés

Mode de fabrication



Le culottage des câbles s'effectue en plusieurs opérations :

1. Pose des ligatures dont une se trouvera en un point bas situé sous le culot.
2. Préparation du câble en chignon (ou perruque). Cette opération consiste à détordre 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).
3. Enfoncement du chignon dans son logement par traction au vérin.
4. Chauffage du culot pour éviter le refroidissement trop rapide du métal fusible et remplissage de la cavité.

Figure 5.94 : Principe du culottage

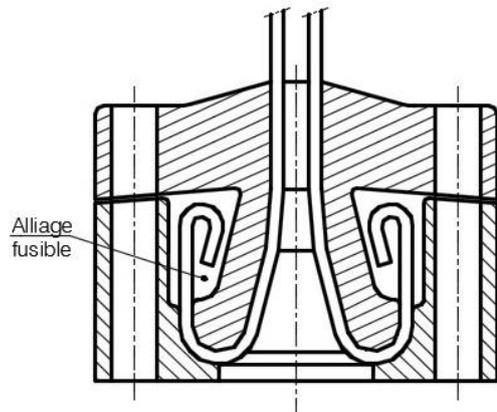
Un culottage de qualité nécessite le maintien rigoureux de l'axe culot-câble. Cette opération est exigeante, nécessite d'utiliser un échafaudage et doit mobiliser une longueur suffisante de câble.

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.

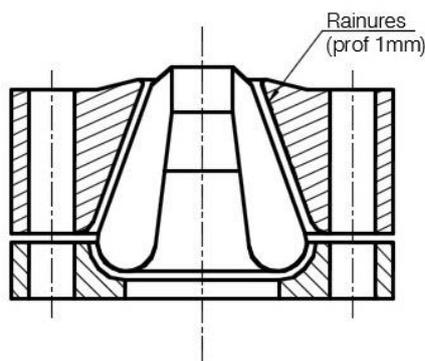
Des culots spéciaux ont été utilisés par le passé. Pour éviter que l'eau ne stagne à l'entrée des culots ou dans les culots au niveau de l'alliage fusible, deux types de culots ont été mis au point :

- des culots avec ancrage des fils au zinc ;
- des culots avec auto-ancrage sans métal de culottage.

Il ne semble pas que ces culots aient été utilisés récemment mais ils pourraient constituer une alternative intéressante dans le cas de problèmes géométriques pour le reculottage de câbles existants.



Culot avec ancrage des fils au zinc



Culot avec auto-ancrage sans métal de culottage

Figures 5.95 et 5.96 : Culots avec ancrage au zinc (en haut) ou avec auto ancrage (en bas)

Matériaux utilisés pour le culottage

Initialement le métal fusible était constitué :

- soit d'un alliage binaire composé de 90 % de zinc (Zn) de haute pureté et de 10 % d'antimoine (Sb) coulé à une température de 500-550 degrés (point de fusion à 450 degrés).
- soit d'un alliage ternaire composé de 84 % de plomb (Pb) de 7 % d'étain (Sn) et de 9 % d'antimoine (Sb). Cet alliage se coule à une température de 340-350 degrés C (point de fusion à 240 degrés).

Actuellement, on utilise du zinc pur à haute teneur (> 99%) porté à une température de 550 degrés, cette dernière technique étant préférée pour les avantages qu'elle présente vis-à-vis du risque de corrosion.

Ces températures sont à respecter rigoureusement : une température trop faible conduit à un mauvais remplissage car le métal se solidifie trop vite alors qu'une température trop forte recuit les fils et modifie leurs caractéristiques mécaniques. Cette contrainte impose un chauffage préalable de la douille et un maintien en température de celle-ci lors de l'opération de culottage.

Une géométrie tulipée de l'évidement facilite le remplissage.

On utilise aussi actuellement des culottages à la résine, solution obligatoire dans le cas d'une gaine en PEHD qui serait brûlée par un métal en fusion.

Dimensionnement

Les culots doivent être capables de transmettre l'effort de rupture du câble et c'est ce que l'on peut constater lors des essais statiques sur des câbles équipés de culots correctement conçus et exécutés. Il n'existe pas de norme française relative à la conception et au dimensionnement des culots.

Le principe général de justification est toujours identique : on écrit l'équilibre du cône en prenant en compte le frottement du zinc sur le culot de douille. On constate alors que le culot est soumis à une traction annulaire assez intense qui le dimensionne.

Les méthodes de calculs présentent des différences sur les hypothèses de répartition de l'effort annulaire sur la longueur du culot, dues à la nature du produit de remplissage, et sur les valeurs du frottement pris en compte. Ces variations peuvent conduire à une assez grande variation dans les résultats.

Barres et étriers d'ancrage – matériaux et filetage

Sur les ouvrages anciens, ces éléments 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, les filets étaient taillés c'est-à-dire réalisés avec enlèvement de matière.

On a aussi utilisé des aciers 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 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, S355 NL 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. L'opération de formage 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.

Ancrage des câbles à fils parallèles

Initialement, dans les câbles à fils parallèles, les fils étaient ancrés en faisant une boucle autour d'une pièce d'acier comportant une gorge. Ce principe est toujours utilisé dans les câbles à fils parallèles des grands ponts suspendus modernes. On trouve sur quelques ouvrages des culots sur d'anciens câbles à fils parallèles mais ceux-ci ne datent pas de la construction de l'ouvrage.

Annexe 6 - Tablier

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

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

Dans le cas d'un pont suspendu, la fonction porteuse est très majoritairement assurée par la suspension et le tablier a surtout le rôle d'assurer la continuité de la voie portée, de répartir et transmettre localement les charges et de rigidifier 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.

Les tabliers des ponts anciens de moyenne portée

Lors de la construction des ouvrages très anciens, l'intérêt des poutres de rigidité n'est pas apparu immédiatement. Les suspentes étaient très rapprochées, les charges mobiles pouvaient être relativement faibles par rapport à la charge permanente, c'est-à-dire au poids du tablier et de ses superstructures. Les déplacements verticaux restaient alors relativement limités alors que le rapprochement des suspentes permettait tout de même une répartition locale de la charge sur les suspentes voisines en dépit de 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.

L'absence d'éléments longitudinaux rigides rendait difficile l'ajout d'un contreventement permettant d'apporter une capacité de flexion dans le plan horizontal afin de résister au vent. Des câbles souvent nommés « câbles au vent » ou câbles de pied étaient donc ajoutés à cet effet. La géométrie de ces câbles a varié. Les plus simples, et les moins efficaces, étaient rectilignes et simplement placés sur les pièces de pont. Ils pouvaient constituer des suspensions paraboliques subhorizontales extérieures au tablier, être disposés en forme de parabole horizontale sous le tablier ou mis en place sous forme de haubans subhorizontaux. Ces câbles modéraient les déplacements verticaux du tablier et limitaient les mauvais comportements vis-à-vis des instabilités aéroélastiques.

Très tôt aux États-Unis, Roebling a compris et exprimé l'intérêt de rigidifier les ponts suspendus pour améliorer leur comportement vis-à-vis des charges mobiles mais aussi du vent. Pour atteindre cet objectif, il utilisait la charge permanente, de puissantes poutres de rigidité en treillis et des haubans verticaux près des pylônes.

L'intérêt des poutres de rigidité peut être décrit comme suit :

- sous charges permanentes, la poutre de rigidité n'est pas fléchie (à l'exception d'une 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 à 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.

Variation de l'élançement L/h en fonction de la portée L

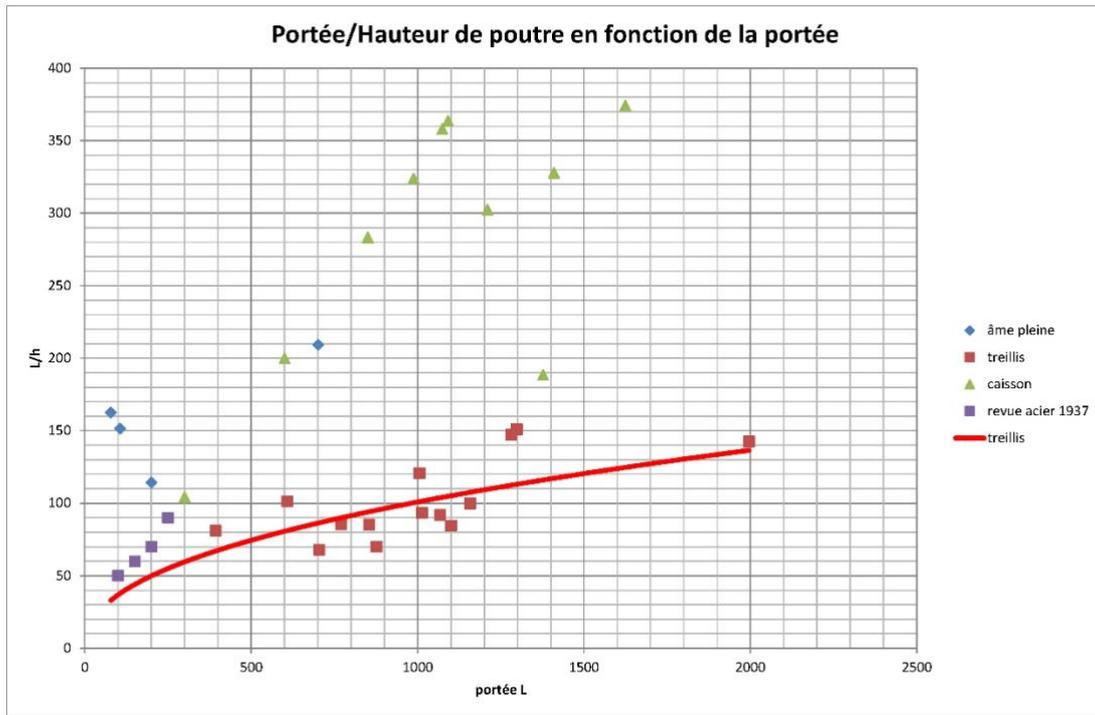


Figure 6.01 : Évolution du rapport Portée/Hpoutre en fonction de la portée L

Différents types de poutres de rigidité

Poutres à treillis reposant sur les pièces de pont

Ces poutres sont habituellement composées de petits profilés (té, cornières et plats). Leur membrure inférieure est posée sur la membrure supérieure des pièces de pont à laquelle elle est fixée par des boulons ou des rivets. L'encastrement ainsi réalisé est souvent insuffisant pour empêcher le déversement de la membrure supérieure au passage de charges mobiles intenses.

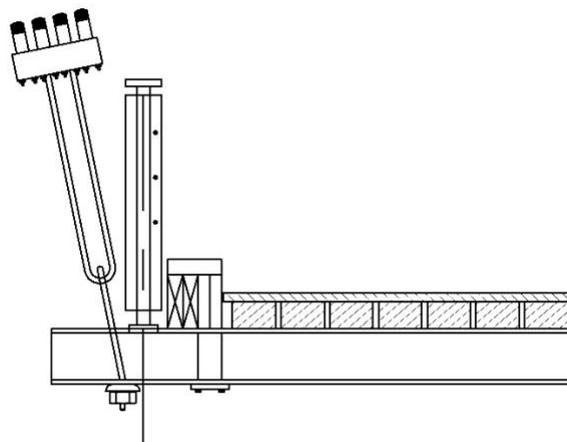
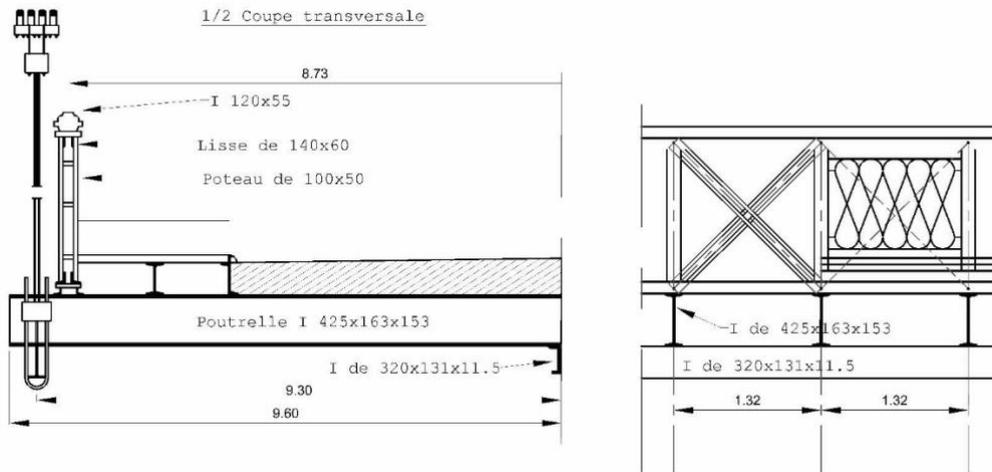


Figure 6.02 : Exemple de pont avec poutre à treillis reposant sur les pièces de pont

L'encastrement de la poutre de rigidité sur la pièce de pont est parfois renforcé par une contrefiche assurant une triangulation extérieure, mais même dans ce cas, la liaison reste assez souple et on constate souvent des déversements de membrure. Ce phénomène est aggravé par les chocs quand ces poutres servent aussi de dispositifs de retenue, les dérèglages de suspensions et le passage d'essieux lourds.

Poutre Arnodin

La poutre Arnodin, du nom de son constructeur, a eu beaucoup d'applications. Dans sa formule la plus aboutie, les membrures et montants sont des profilés métalliques alors que les diagonales sont formées avec des ronds. Les assemblages des diagonales et des montants sont réalisés avec des axes. La membrure supérieure est parfois renforcée avec des profilés de type fers Zores.

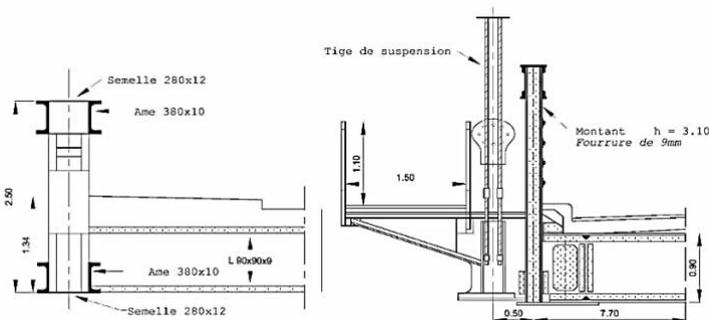


Figures 6.03 et 6.04 : Exemple de tablier de pont comportant des poutres Arnodin

Dans certaines poutres, seules les membrures inférieures et les montants sont des profilés rigides alors que l'on utilise des câbles pour constituer la membrure supérieure et les diagonales. Les câbles constituant les diagonales sont déviés sur des poulies et ancrés aux extrémités du tablier.

Poutres triangulées

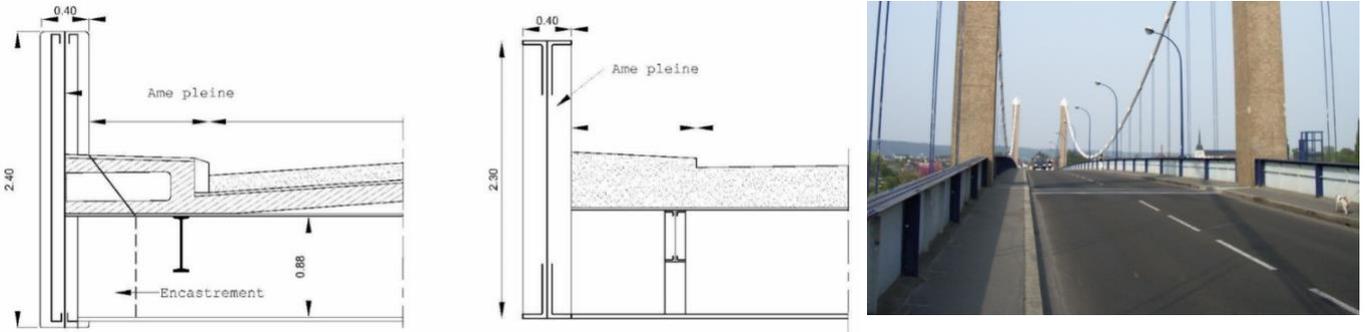
Différents types de triangulations sont utilisés : Warren avec ou sans montant, croix de saint André, etc. Dans les ponts plus récents et plus importants, on utilise dans les triangulations des profilés de forte section ou des caissons reconstitués ouverts ou fermés. La rigidité de ces éléments permet alors un encastrement efficace sur les pièces de pont.



Figures 6.05 à 6.07 : Exemples de ponts avec poutres triangulées : le pont de Tournon et le pont de Serrière

Poutres à âmes pleines

Dans certains ouvrages plus récents de portée moyenne, on trouve des poutres de rigidité à âme pleine, option qui ne présente pas d'inconvénient particulier.



Figures 6.08 à 6.10 : Exemples de ponts à poutres latérales à âme pleine : le pont d'Aiguilly et le pont d'Aubenas

Les tabliers les plus anciens

Sur les ponts les plus anciens, on trouve des suspentes très rapprochées, souvent d'environ 1 m. À chaque paire de suspentes est fixée une pièce de pont en acier ou en bois. Ces pièces de pont sont ensuite reliées par des longerons en bois supportant un platelage transversal d'usure et des trottoirs. On trouve latéralement de simples garde-corps ou une poutre en treillis de bois très souple qui assure aussi cette fonction.

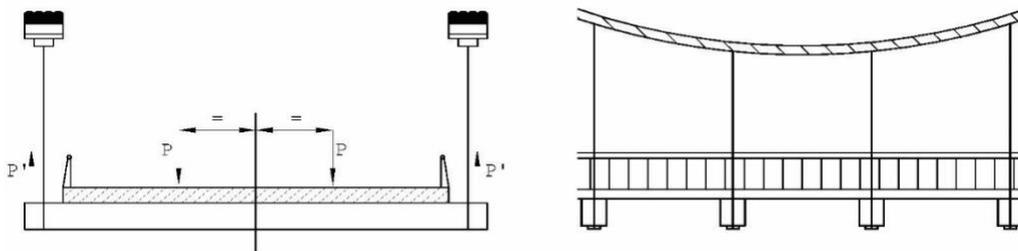
Comme indiqué plus haut, ces tabliers étaient complétés par des câbles au vent destinés à modérer les déplacements verticaux et transversaux et donc à améliorer le comportement au vent. Il reste peu d'ouvrages de cette génération. Ceux encore en service comportent généralement une seule voie très étroite et sont réservés à des véhicules légers.

L'absence de capacité de flexion du tablier rend ces ouvrages sensibles localement à la rupture accidentelle d'une suspente.

Ces ouvrages imposent au titre de la maintenance un remplacement périodique du platelage d'usure en bois.

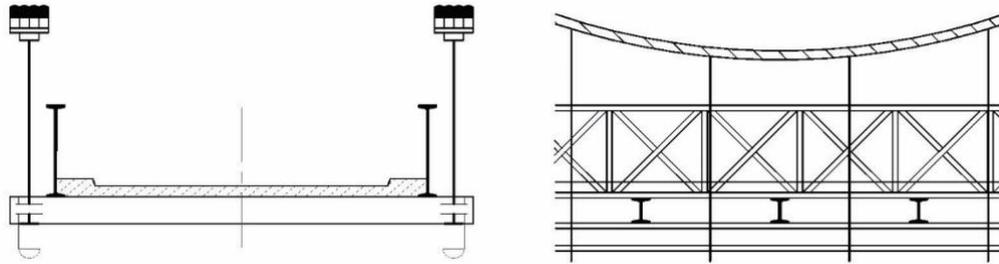
Les différentes combinaisons attaches de suspentes – pièces de pont – poutres de rigidité

On trouve chronologiquement les dispositions suivantes.



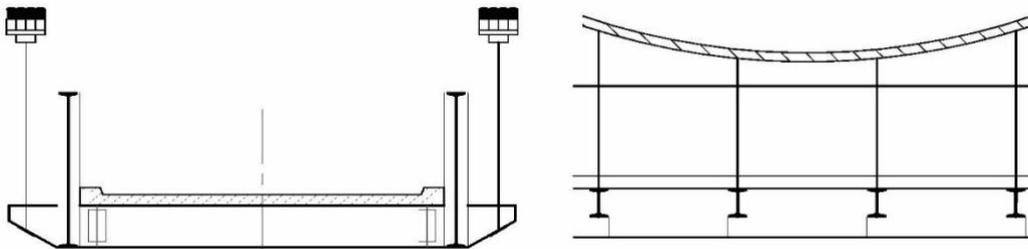
Figures 6.11 et 6.12 : Platelage directement appuyé sur les pièces de pont et pas de poutre de rigidité

Le platelage est directement appuyé sur les pièces de pont, les suspentes sont rapprochées, on constate l'absence de poutre de rigidité.



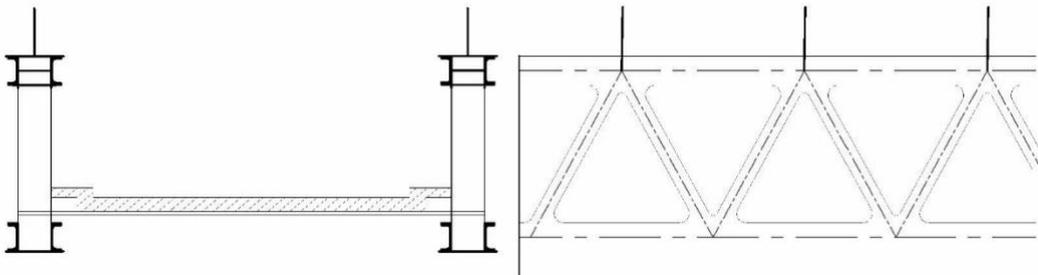
Figures 6.13 et 6.14 : Platelage et poutres de rigidité appuyés sur les pièces de pont

Les poutres de rigidité sont posées sur les pièces de pont auxquelles elles sont fixées par boulonnage ou rivetage. Les pièces de pont sont, elles-mêmes, fixées sur des longerons accrochés aux suspentes.



Figures 6.15 et 6.16 : Platelage appuyé sur des pièces de pont encastrées sur les poutres de rigidité

Les fibres inférieures des poutres de rigidité et des pièces de pont sont alignées, ce qui rend beaucoup plus efficace l'encastrement des poutres de rigidité sur les pièces de pont. Le risque de déversement des poutres de rigidité est mieux géré.



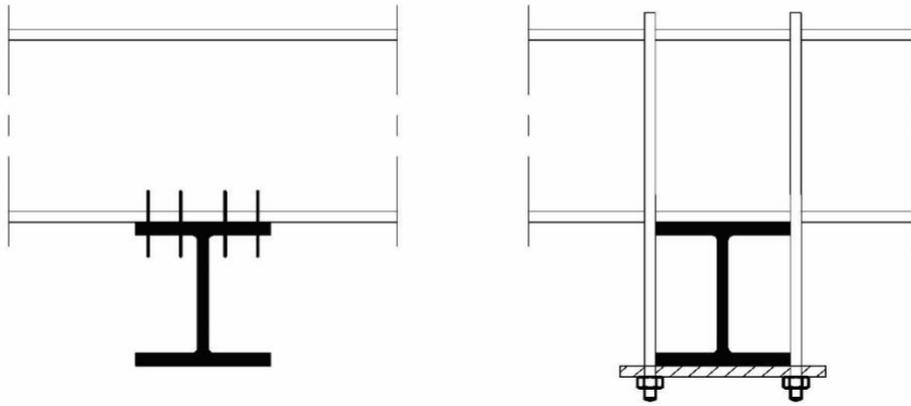
Figures 6.17 et 6.18 : Platelage appuyé sur la membrure inférieure des poutres de rigidité

Dans les ouvrages les plus récents, les poutres de rigidité sont des poutres triangulées dont les membrures et diagonales ont des inerties de flexion importantes. Les membrures supérieures sont alors efficacement tenues transversalement. Cette disposition est complétée par l'accrochage des suspentes au niveau des nœuds de triangulation supérieurs de la poutre de rigidité. Cette conception est bien adaptée aux ponts de moyenne portée.

Pièces de pont et longerons

Des pièces de pont en bois ont été utilisées sur les ouvrages de la première génération mais ont rapidement été remplacées sur les ouvrages plus récents par des pièces de pont en fer puddlé ou en acier. Des longerons en bois ont persisté plus longtemps. Dans les ouvrages plus récents, ces éléments sont tous en acier.

Les longerons et pièces de pont ont été assemblés par étriers puis par boulonnage et enfin par soudure.



Figures 6.19 et 6.20 : Différents types d'assemblage entre longerons (en haut) et pièces de pont (en bas)

Les longerons peuvent avoir deux fonctions : transférer les charges du platelage sur les pièces de pont mais aussi répartir de manière plus favorable l'effet des charges locales sur un plus grand nombre d'éléments transversaux.

On a ainsi souvent ajouté des sous-longrines de répartition sur des ouvrages existants. Ces dernières étaient des profilés laminés puissants, placés longitudinalement sous les pièces de pont et fixés par étriers. Ces modifications étaient effectuées dans le but de faire passer des charges mobiles plus importantes sur les ouvrages en modifiant de manière plus favorable la répartition des efforts entre les pièces de pont. L'effet de ces sous-longrines peut en effet être favorable si elles sont correctement conçues (choix des rigidités, attaches sur les pièces de pont et mode d'appui aux abouts) mais leur avantage a parfois été surévalué en s'appuyant sur des méthodes de quantification trop sommaires.

Les différents types de platelage

Les platelages en bois

On trouve encore quelques ouvrages équipés d'un platelage en bois. Ce mode de couverture est le plus ancien qui ait été utilisé. Le bois a depuis souvent été remplacé par une couverture en béton ou en métal quand la structure du tablier et la capacité de la suspension le permettaient.

Le platelage en bois est composé en principe de madriers jointifs en bois résistant, qui supportent des planches disposées perpendiculairement aux madriers et faisaient office de surface de roulement. Suivant l'espacement des pièces de pont et des longerons qui supportent le platelage, l'épaisseur totale de ce dernier peut varier de 11 cm minimum (madriers 8 x 23 cm posés à plat et planches de 3 cm) à 25 cm (madriers non jointifs), ce qui représente un poids approximatif de 100 à 160 kg/m².

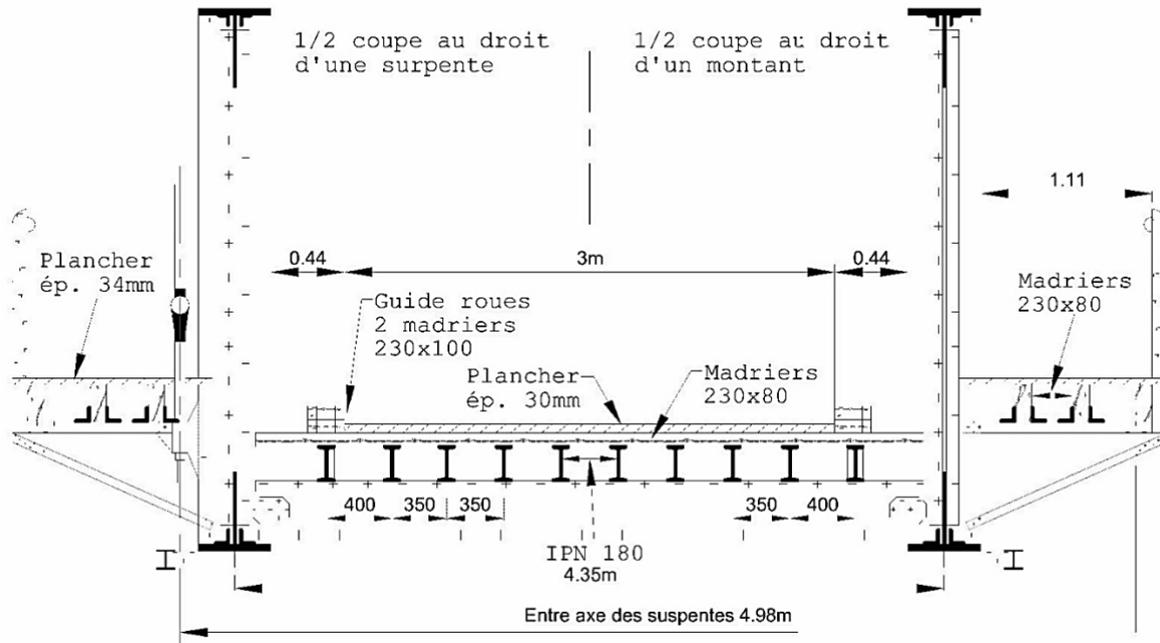


Figure 6.21 : Coupe transversale d'un tablier comportant un platelage en bois

Les dalles en béton armé

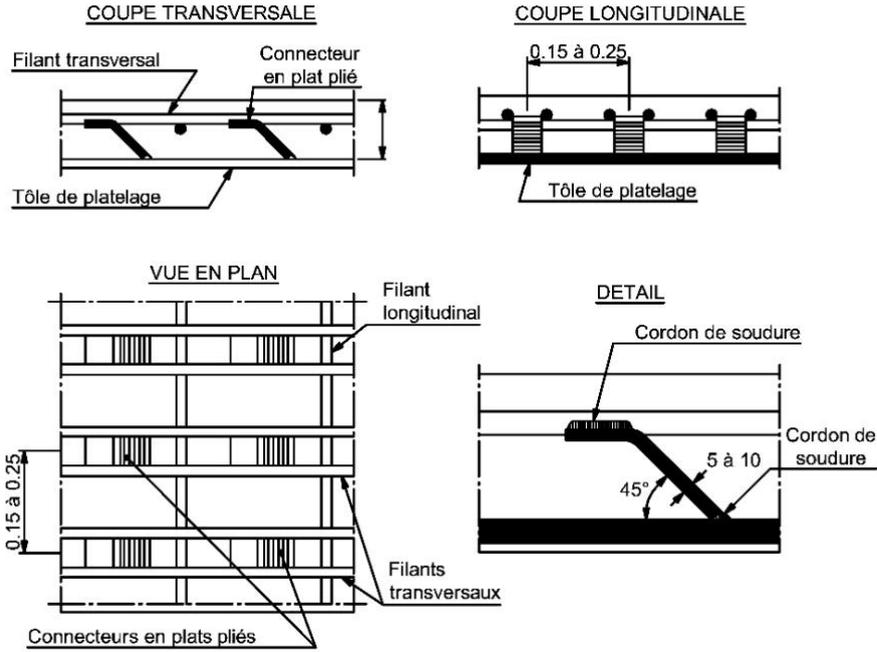
On trouve ce type de dalles sur beaucoup de ponts suspendus. Leur épaisseur est souvent faible si on se réfère aux usages actuels. On trouve en effet des épaisseurs de 17 cm sous la chaussée et 6 cm sous les trottoirs avec des enrobages faibles ou très faibles.

Des bétons trop poreux, l'absence fréquente d'étanchéité, des charges plus élevées que les charges de dimensionnement ainsi que de faibles enrobages ont souvent conduit à un vieillissement assez rapide du matériau béton armé. Cependant il ne semble pas que l'on ait constaté de rupture de dalle. Ces éléments présentent en effet de fortes capacités d'adaptation (flexion transversale puis fonctionnement en membrane).

En cas de remplacement, l'utilisation de bétons légers présentant une densité de 1,8 au lieu de 2,4 permet d'augmenter les épaisseurs.

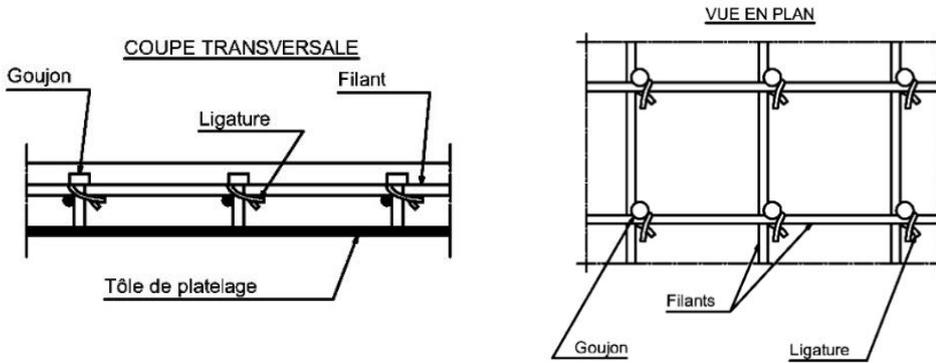
Les dalles mixtes

Ce type de platelage est constitué d'une dalle mince en béton armé associé à une tôle d'acier à laquelle elle est liaisonnée par des connecteurs. Ce platelage équipe un nombre limité d'ouvrages car il se justifie surtout pour les grandes portées (ponts de Tancarville et d'Aquitaine). Il est remplacé dans les ponts plus récents par la dalle orthotrope.



Figures 6.22 à 6.25 : Dalle mixte de type Robinson avec connecteurs en plats pliés

La tôle d’une épaisseur de 8 ou 9 mm sert de coffrage à une dalle d’une épaisseur de 8 à 10 cm lors de la construction et sert ensuite d’armature tendue en service. Les valeurs précédentes correspondent à un espacement des longerons de 2,50 à 3 m. Ce type de platelage pèse environ 280 kg/m².



Figures 6.26 et 6.27 : Dalle mixte avec connecteurs de types goujons

Les dalles orthotropes

Une dalle orthotrope (orthogonalement anisotrope) est une tôle de 12 (anciennement) ou 14 mm (actuellement pour des raisons de résistance à la fatigue) raidie par des augets en tôle pliée d’une épaisseur de 6 à 8 mm. Ces augets sont soudés sur la tôle principale selon un entraxe d’environ 60 cm.

Ce type de platelage très léger (180 kg/m²) est utilisé dans les tabliers en caisson des ponts de grandes portées modernes ainsi que dans les tabliers des ponts mobiles.

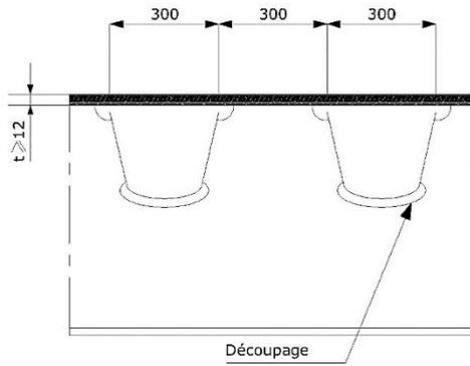


Figure 6.28 : Schéma de principe d'un platelage de type dalle orthotrope

Les autres types de platelages métalliques

On a utilisé lors de la réhabilitation d'ouvrages anciens, de nombreux systèmes permettant de réaliser des platelages légers, le plus souvent afin de remplacer des platelages en bois.

Des tôles soudées sur des profilés laminés permettent de réaliser des platelages d'un poids allant de 180 à 250 kg/m².

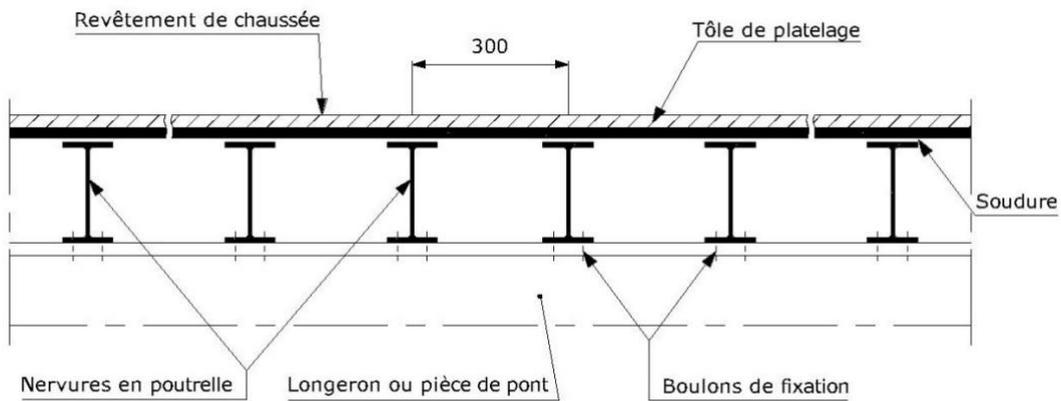


Figure 6.29 : Platelage constitué de tôles soudées sur des profilés laminés

Des profilés spéciaux nervurés en aluminium filés ont permis de réaliser des platelages très légers, de l'ordre de 50 kg/m², pour une épaisseur de l'ordre de 10 cm.

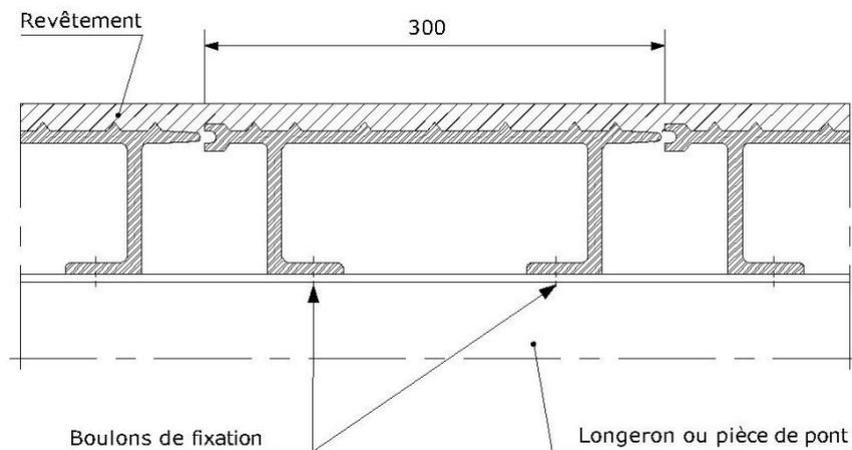
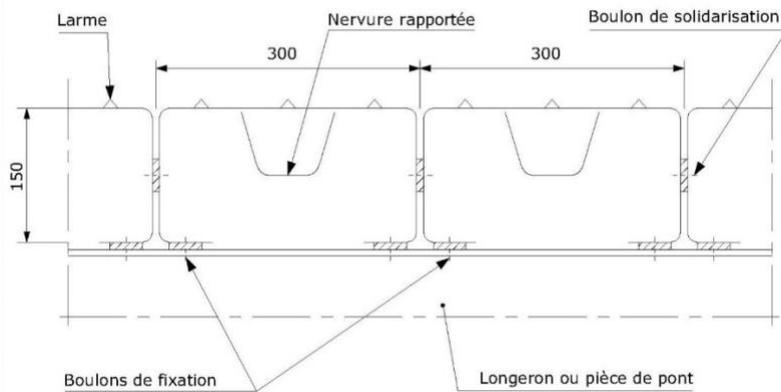


Figure 6.30 : Platelage constitué de profilés en aluminium filés

Les caissons de type Arnodin sont obtenus par pliage d'une tôle à larmes. En partie supérieure, ils sont raidis par un petit auget central soudé. Ces caissons permettent de réaliser un platelage qui pèse de 120 à 150 kg/m².



Figures 6.31 et 6.32 : Platelages constitués de caissons Arnodin

Enfin, les caillebotis permettent de réaliser des platelages de 100 kg/m² avec des appuis espacés de 0,80 m à 2 m. Ils sont très faciles à monter et sont fixés par boulonnage. Leur porosité vis-à-vis du vent les font utiliser dans les platelages de travées basculantes car ils réduisent la charge de vent sur la volée dressée. Ils sont également fréquents sur les voies centrales des grands ponts américains car l'introduction d'une porosité dans le platelage améliore les caractéristiques aérodynamiques du tablier. Ces caillebotis présentent aussi un bon comportement en cas d'enneigement.

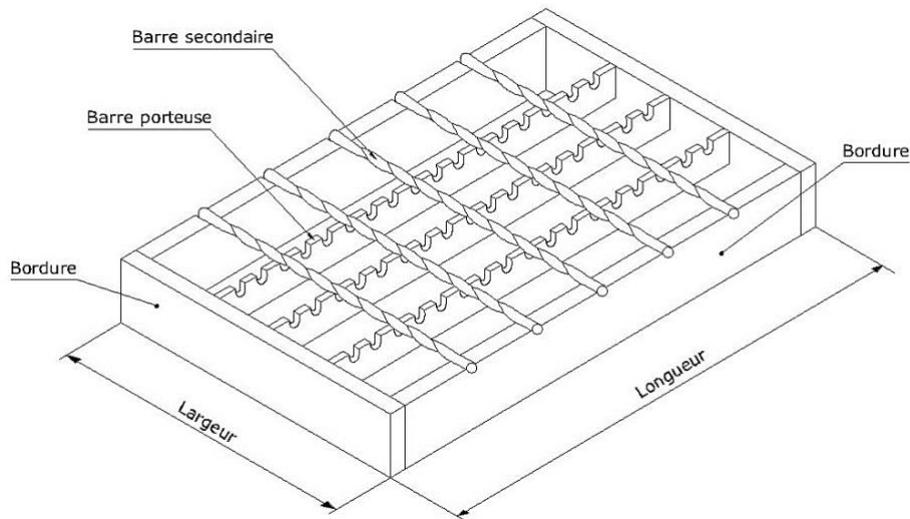
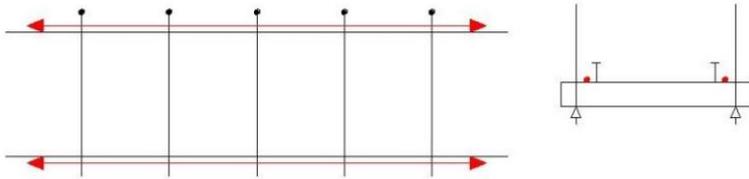


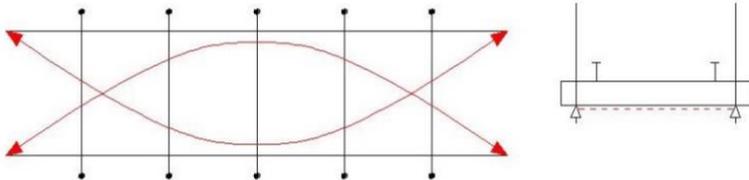
Figure 6.33 : Morphologie d'un caillebotis utilisé pour constituer des platelages

Les câbles « au vent »

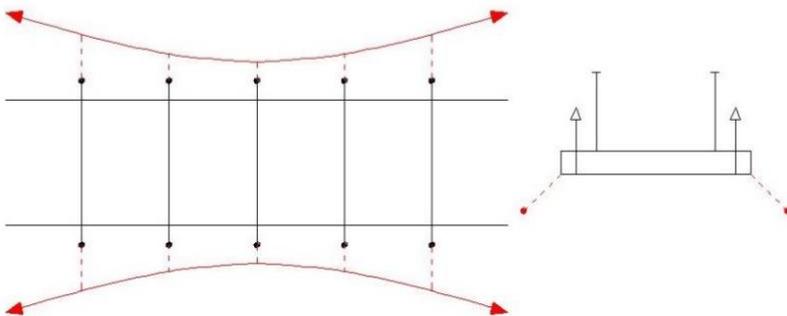
Dans le cas des tabliers souples de petite et moyenne portée mais aussi dans le cas de grands ponts à tablier rigide aux Etats-Unis, on a cherché à améliorer la résistance au vent en ajoutant des câbles.



Des câbles droits sont posés sur les pièces de pont entre les suspentes et le platelage mais ces câbles ne devenant efficaces qu'en prenant des flèches importantes, cette disposition n'est admissible qu'avec des sollicitations de vent modérées.



On utilise la largeur du tablier pour placer des câbles paraboliques plus efficaces pour reprendre les efforts transversaux. Dans le cas où on a des poutres de rigidité, il est aussi possible de placer un contreventement.



Des suspensions extérieures sub horizontales réalisées avec des câbles paraboliques sont très efficaces.

Figures 6.34 à 6.36 : Différents types de câbles au vent

Stabilité aéroélastique des ponts modernes de grande portée

Les premiers constructeurs de ponts avaient décrit les phénomènes d'instabilités constatés lors des tempêtes.

Aux États-Unis, J. Roebling avait signalé l'importance de rigidifier les ouvrages, y compris dans le plan vertical, pour résister au vent. Les phénomènes d'instabilité aéroélastiques découverts et théorisés lors des débuts de l'aviation ne paraissaient pas pouvoir apparaître sur les tabliers de ponts mais l'effondrement en 1940 du pont de Tacoma aux États-Unis démontra le contraire.

Le pont de Tacoma avait trois travées suspendues présentant des longueurs respectives de 335,40 m, 853,70 m et 335,40 m.

Le tablier, assez étroit, possédait deux poutres de rigidité latérales à âmes pleines d'une hauteur de 2,45 m, espacées comme les câbles porteurs de 11,90 m. L'ouvrage était correctement dimensionné pour les charges permanentes, les charges d'exploitation et les charges statiques transversales de vent.

Les fréquences propres de flexion étaient de 0,133 Hz et 0,145 Hz alors que les premiers modes de torsion étaient à 0,233 Hz et à 0,200 Hz.

Le jour de l'accident, un vent de 65 km/h, soit 18 m/s, commença à souffler en permanence et le tablier se mis à flotter avec un gauchissement d'environ 35 degrés sur l'horizontale, alternativement dans un sens puis l'autre, la répartition dans la grande travée correspondant à une sinusoïde. Une heure après l'apparition de ce phénomène, le pont a été complètement détruit.

Cet accident a interpellé les constructeurs du monde entier : le phénomène a été identifié, de nombreux ouvrages ont été modifiés et de nouveaux principes de conception ont été retenus lors des réalisations suivantes.

L'instabilité aéroélastique résulte d'un couplage entre les forces aérodynamiques exercées par le vent sur le tablier et différents modes d'oscillations de la structure. Les oscillations sont entretenues par la variation des forces du vent due au déplacement du tablier. Quand l'énergie apportée par le vent ne peut plus être dissipée par l'amortissement interne de la structure, le phénomène est divergent et aboutit à l'effondrement.

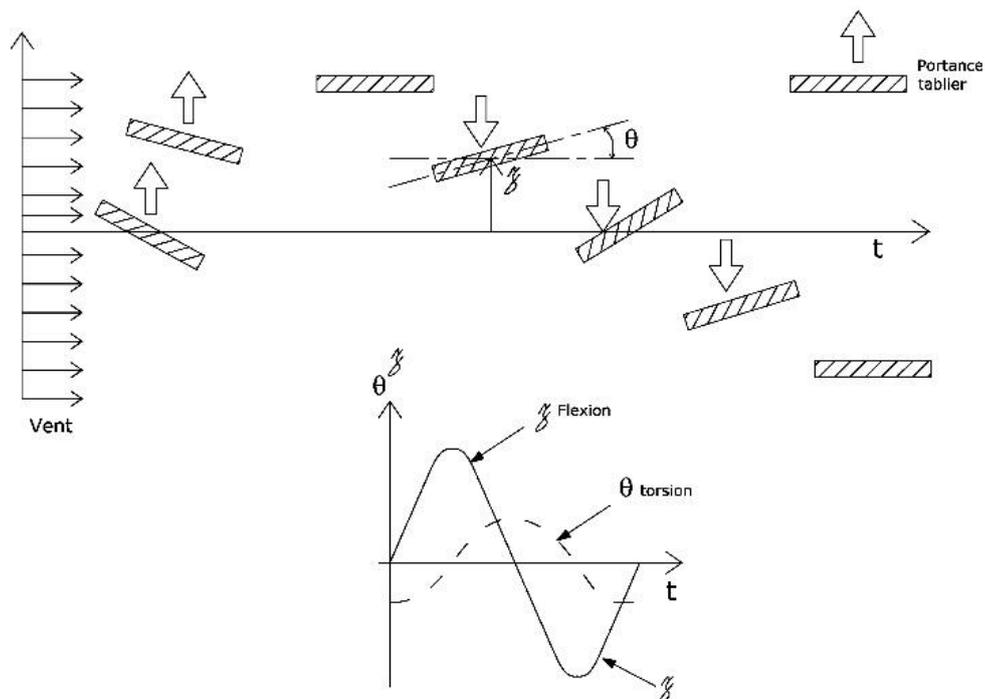
L'instabilité peut intervenir par couplage de différents modes d'oscillations :

- la torsion pure ;
- l'instabilité de flottement en flexion pure dans un plan vertical (galloping) ;
- l'instabilité de flottement en torsion et flexion couplées (classical flutter).

Le phénomène est généralement déclenché par les échappements tourbillonnaires, aussi appelés tourbillons de Karman, qui se produisent autour d'un obstacle placé dans un écoulement laminaire, par exemple dans une rivière à l'aval d'une pile de pont. Leur fréquence dépend principalement de la vitesse du fluide et leur apparition provoque les premiers mouvements.



Figure 6.37 : Échappements tourbillonnaires de Von Karman



Figures 6.38 et 6.39 : Illustration d'un comportement aéroélastique en torsion et flexion couplées (classical flutter).
(Source : Les ponts haubanés de René Walther)

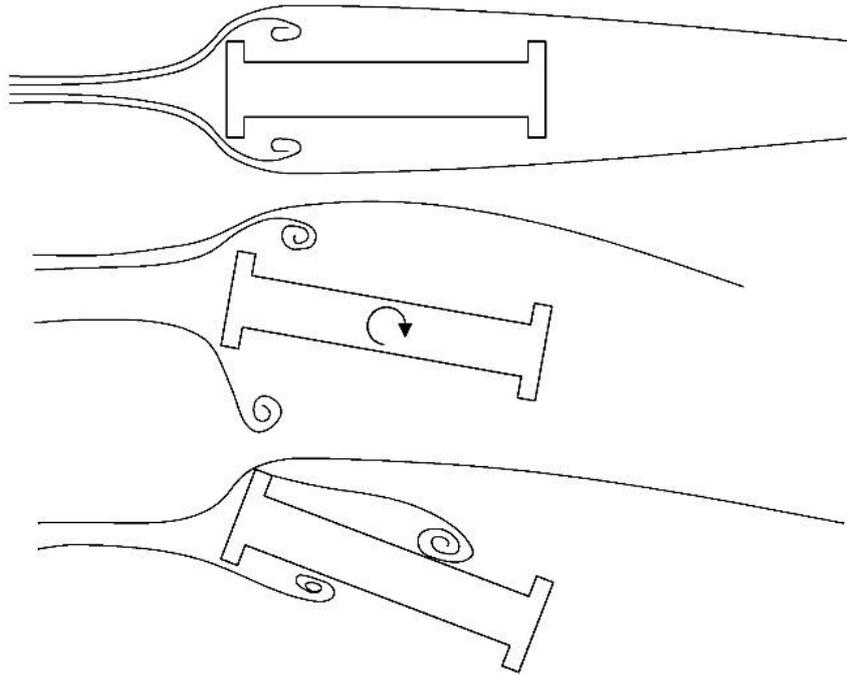


Figure 6.40 : Principe des écoulements du vent autour du tablier du pont de Tacoma pendant l'instabilité aérodynamique de torsion

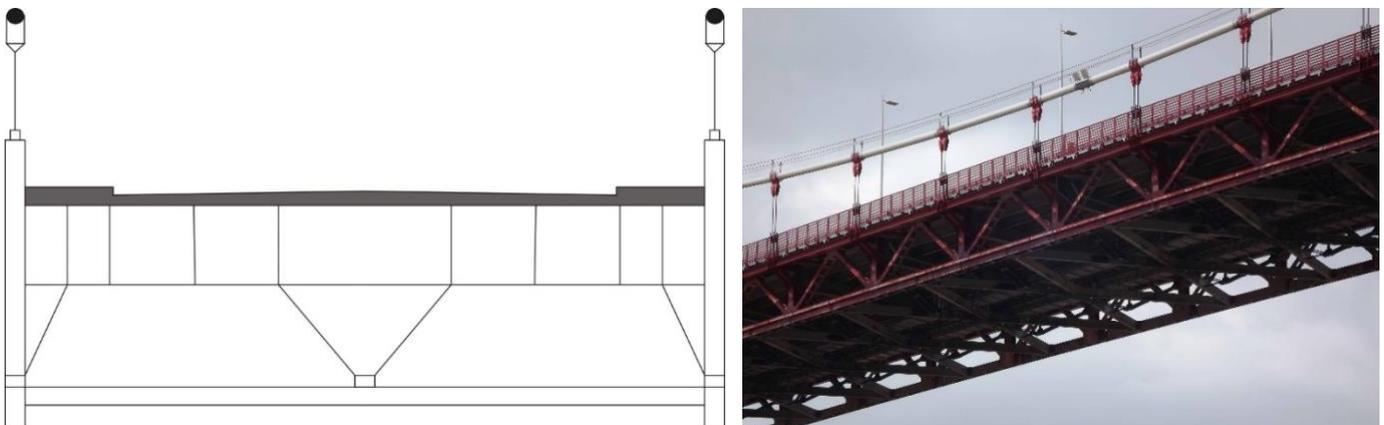
Cet accident a eu plusieurs conséquences importantes : les ponts de grande taille furent examinés et renforcés d'urgence et la conception des ponts de grande portée fut revue.

Nous décrivons ci-dessous les deux réponses structurelles apportées par les ingénieurs à ce phénomène d'instabilité aérodynamique.

Poutres latérales hautes en treillis et contreventement inférieur

Dans cette première approche, dite de l'école américaine, on agit sur le comportement dynamique de la structure en ajoutant :

- de puissantes poutres latérales en treillis présentant peu de surface au vent mais agissant sur les oscillations de flexion verticale ;
- un contreventement inférieur qui modifie la fréquence des oscillations de torsion qui ne peuvent ainsi plus être couplées avec les oscillations de flexion.



Figures 6.41 et 6.42 : Conception moderne avec poutres latérales en treillis et contreventement horizontal

Les deux grands ponts suspendus français, le pont de Tancarville et le pont d'Aquitaine, résultent directement de cette approche, qui est encore utilisée par les concepteurs de ponts suspendus. Sur le pont de Tancarville, pour une portée centrale de 608 m, les poutres ont une hauteur de 6 m et un entraxe de 16 m. Sur le pont d'Aquitaine à Bordeaux, pour une portée centrale de 393,75 m, les poutres ont une hauteur de 4,83 m et un entraxe de 20,90 m.

Sur le pont d'Akashi-Kaikyo au Japon, pour une portée centrale de 1991 m, les poutres ont une hauteur de 14 m et un entraxe de 35,50 m.

Sur certains grands ponts américains, la hauteur importante des poutres de rigidité permet une exploitation sur deux niveaux. Le platelage inférieur peut ainsi être utilisé pour le transport par rails.

Caisson profilé en acier

Dans cette seconde approche, dite de l'école anglaise, on profile le tablier comme une aile d'avion inversée pour que la portance créée par le vent soit principalement dirigée vers le bas, ce qui stabilise la structure. Cette méthode utilisée en 1966 sur le pont sur la Severn a été utilisée depuis sur de nombreux ouvrages de grande portée, qu'ils soient haubanés ou suspendus. Les caissons ont habituellement une hauteur de 3 à 5 m, quelle que soit la portée.

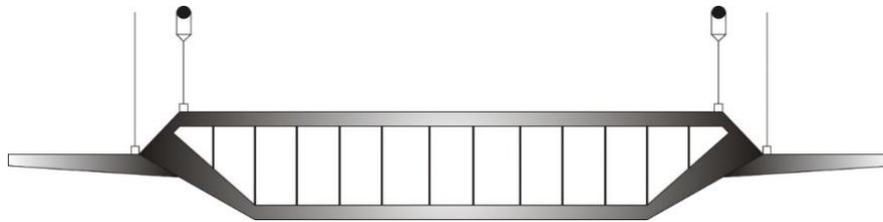


Figure 6.43 : Conception moderne avec caisson profilé en aile d'avion

Deux exemples récents : le pont du Chavanon et le grand pont sur la Loire

Le pont du Chavanon sur l'autoroute A89

Le pont du Chavanon sur l'autoroute A89 est un pont à une travée à suspension centrale de 360 m de longueur totale. Les attaches basses de suspentes sont implantées dans le TPC. La distance entre appuis des câbles est de 300 m. La suspension étant axiale, le tablier est très rigide en torsion. Comme il passe sans s'appuyer entre les jambes des pylônes, la portée de torsion est de 360 m.

Le tablier est un caisson mixte acier-béton de 22,04 m de large et de 3,00 m de hauteur totale avec des bracons intérieurs et extérieurs. Les bracons extérieurs supportent les encorbellements. Les bracons intérieurs diffusent l'effet d'ancrage des suspentes ancrées sur un petit caisson central.

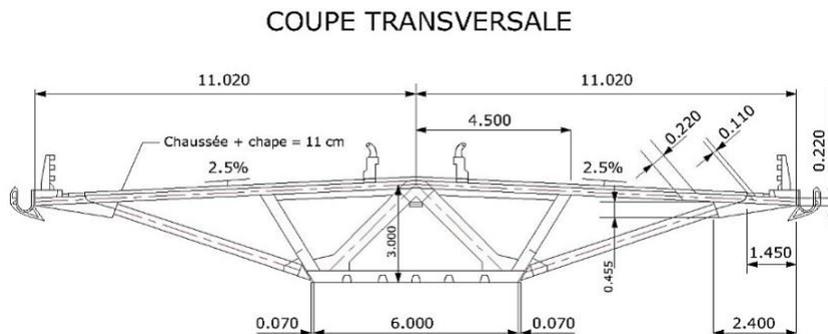


Figure 6.44 : Coupe transversale du tablier du viaduc du Chavanon

Le grand pont sur la Loire

Le grand pont sur la Loire est un pont auto-ancré à une travée suspendue, de 270 m de longueur totale. Son tablier est un bipoutre mixte dont la charpente a été mise en place par lançage sur des palées provisoires. Ses nappes de suspension sont inclinées par rapport à la verticale. La portée du câble est de 200 m. La composante ascendante de la traction des câbles porteurs n'est pas reprise par un accrochage sur les culées comme traditionnellement mais par un lest de l'about de tablier. Les réactions d'appui sont donc toutes positives, ce qui donne à la structure une robustesse plus satisfaisante que la conception classique.

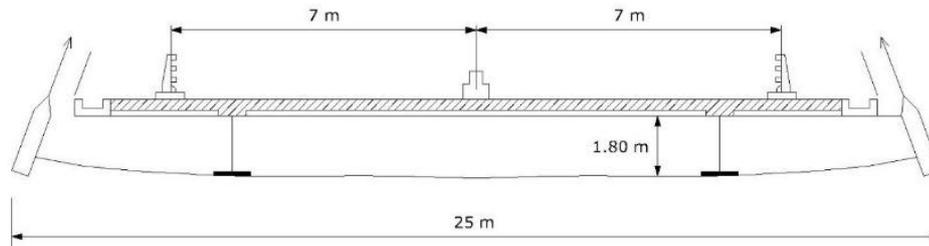


Figure 6.45 : Coupe transversale du tablier du grand pont sur la Loire

Annexe 7 - Appareils d'appui

Dans le cas des ponts suspendus, les appareils d'appui ont un fonctionnement particulier car ils sont peu chargés verticalement mais 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'enfonçant 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'appui doivent donc supporter des réactions verticales des deux signes, ce qui est assez rare sur un pont). D'autre part, 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. Enfin, les structures suspendues étant souples, les appareils d'appui doivent permettre des rotations importantes dans le plan vertical (charges d'exploitation) et horizontal (charges de vent).

Dans ce contexte, les appareils d'appui des ponts suspendus 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).

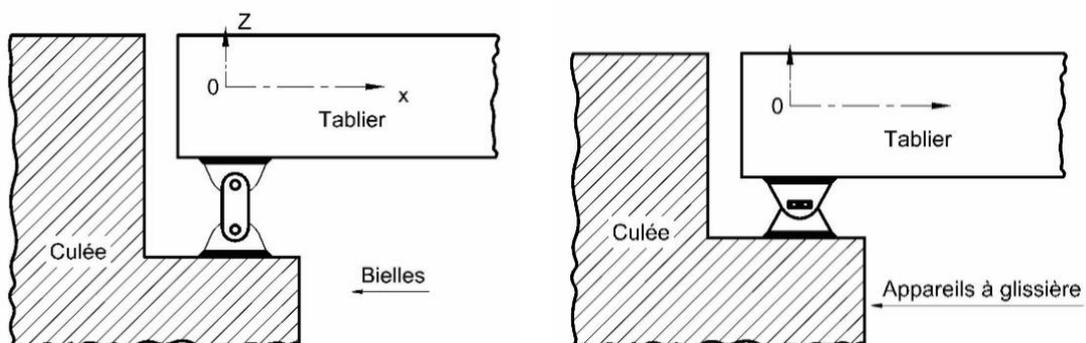
Un ensemble de fonctions qui leur confère une complexité nettement supérieure à celle des appareils d'appui d'un pont classique.

Rôles des appareils d'appui

Opposition à la translation verticale

On trouve :

- les bielles ;
- les appareils à glissières ;
- les coulisseaux.



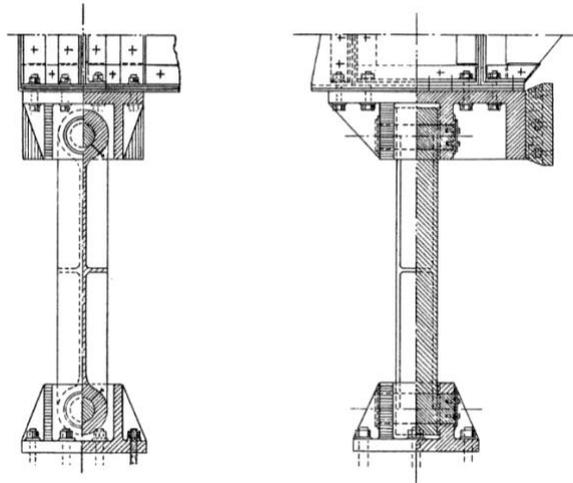
Figures 7.01 et 7.02 : Principes d'appareils d'appui avec bielle, à gauche, et à glissière, à droite

Suivant leur conception, les appareils à glissière peuvent aussi s'opposer à la translation transversale.

Les coulisseaux sont souvent réalisés de manière très simple : il s'agit d'un profilé laminé glissant dans une boîte encastrée sur du béton ou scellée dans des maçonneries. Le profilé peut être muni de grains d'appuis afin de laisser libres les rotations. Cette dernière solution est acceptable sur les ouvrages supportant une faible circulation de véhicules légers ou sur les passerelles pour piétons.

La bielle d'appui n'est généralement pas apte à reprendre les efforts transversaux.

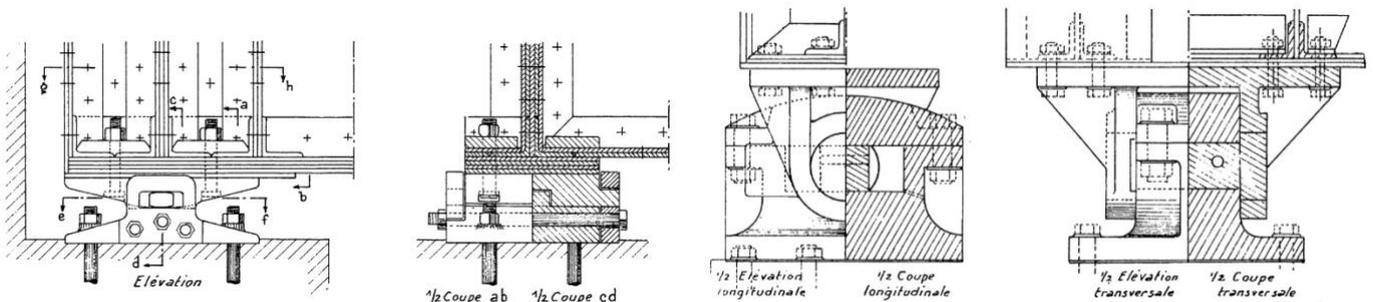
Exemple de bielle d'appui



Figures 7.03 et 7.04 : Exemple de bielle d'appui

Exemples d'appareils d'appui à glissière

L'appui à glissière est un appareil rustique dans lequel on compte sur les jeux pour permettre les rotations. En cas de réaction positive, le balancier supérieur appuie (cylindre sur plan) sur la platine inférieure. En cas de réaction négative, l'ergot appuie (cylindre sur plan) sur l'oreille latérale. Les jeux permettent les déplacements longitudinaux.



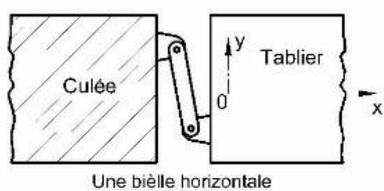
Figures 7.05 à 7.08 : Détails de différents appareils d'appui à glissières



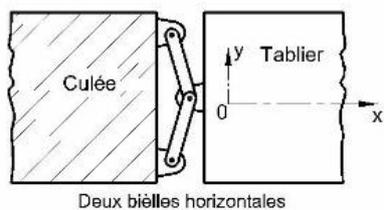
Figures 7.09 à 7.12 : Bielles et butées au vent

Opposition à la translation transversale

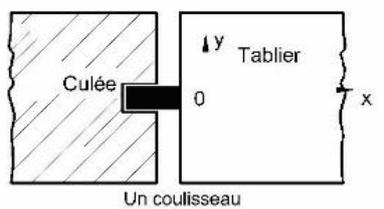
On peut utiliser :



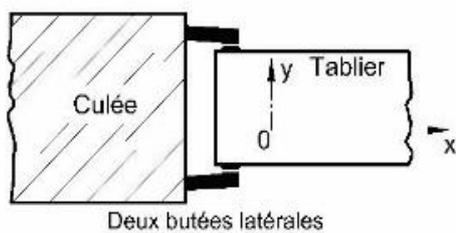
Une bielle horizontale.



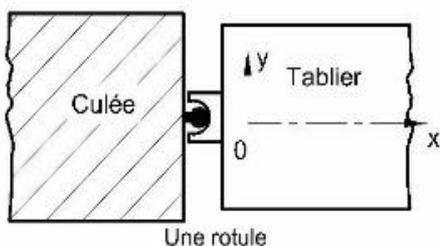
Deux bielles horizontales



Un coulisseau.



Des butées latérales.



Une rotule.

Figures 7.13 à 7.17 : Dispositions bloquant la translation transversale

Autres systèmes possibles

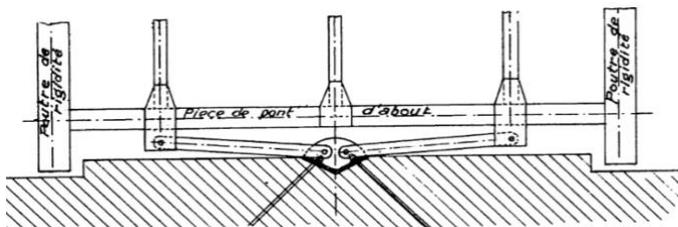


Figure 7.18 : Utilisation de deux bielles transversales pour bloquer le mouvement transversal

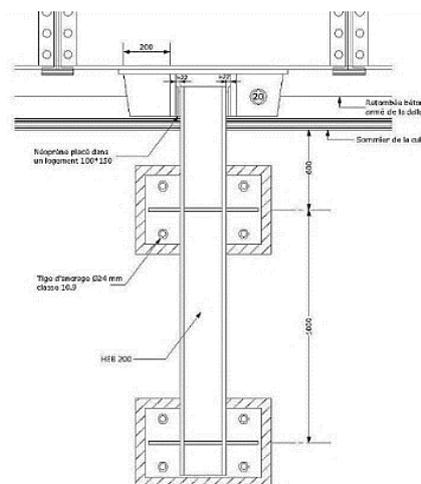
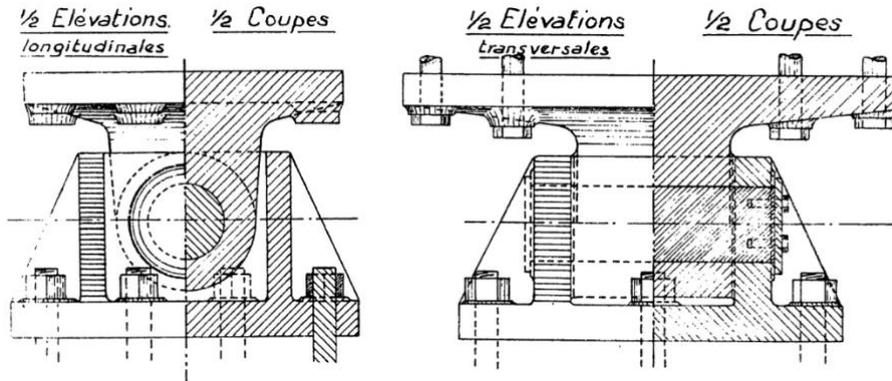


Figure 7.19 : Utilisation d'une butée verticale pour bloquer le mouvement transversal

Pont fixe longitudinal

Ces appareils d'appui s'opposent généralement à plusieurs mouvements.



Figures 7.20 et 7.21 : Exemple d'appareil d'appui constituant un point fixe longitudinal

Dans les ouvrages anciens de portée modeste, on utilisait fréquemment des jeux mécaniques qui autorisaient de manière plus ou moins satisfaisante les degrés de liberté recherchés. Quand on s'interdit ce principe, par exemple dans le cas des grands ouvrages, les rotules doivent libérer certains degrés de liberté et deviennent des pièces mécaniques complexes.

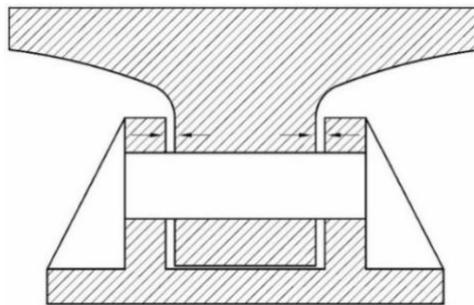


Figure 7.22 : Exemple d'appareil d'appui dont les jeux libèrent certains déplacements

Choix d'un système d'appareils d'appui

Le système d'appui doit répondre à un certain nombre de fonctionnalités précises.

- bloquer le déplacement vertical à chaque extrémité de tablier et, dans le cas de tabliers continus sur plusieurs travées suspendues, au passage des pylônes, quel que soit le signe de la réaction et en laissant libre les rotations dans le plan vertical ;
- assurer un point fixe longitudinal au tablier ;
- laisser libres les variations de longueur du tablier dues aux effets thermiques ;
- assurer des appuis au vent à chaque extrémité du tablier ;
- laisser libres les rotations dans le plan horizontal.

La mise en place de deux appuis fixes à une extrémité du tablier crée un encastrement dans le plan horizontal qui peut faire apparaître un moment de flexion intense sous les charges de vent.

Le moment d'encastrement qui apparaît sous la charge de vent est équilibré par les efforts horizontaux dans les appuis fixes. Ces efforts détruisent rapidement ces appuis s'ils n'ont pas été pris en compte dans leur dimensionnement.

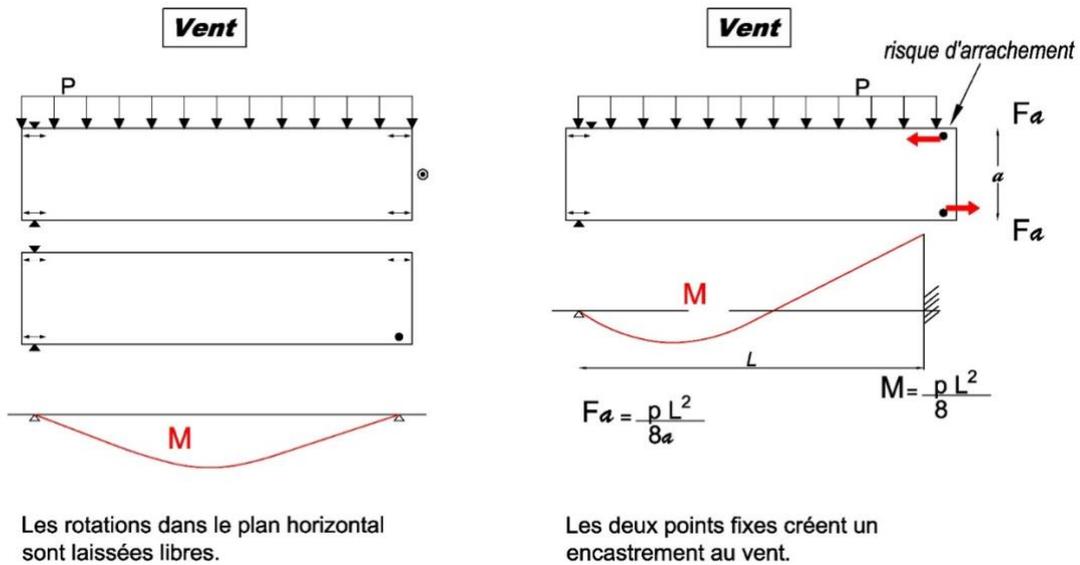


Figure 7.23 : Impact d'un second appareil d'appui fixe sur culée sur les efforts dus au vent

Schéma mécanique d'ensemble

Le schéma mécanique d'ensemble doit être cohérent et répondre à l'ensemble des fonctionnalités décrites précédemment. Quand cela n'est pas le cas, le système d'appuis peut se dégrader rapidement voire provoquer des désordres structurels importants.

Exemple de schéma incorrect

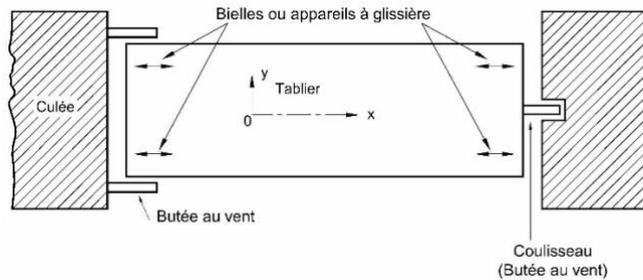


Figure 7.24 : Système d'appui sans point fixe longitudinal

Sur le schéma ci-dessus, le point fixe longitudinal est manquant. Dans certains ouvrages légers, il semble que l'absence de point fixe longitudinal ne pose pas de problème. Des butées longitudinales avec contact en caoutchouc ont toutefois été ajoutées sur des tabliers supportant un trafic important afin de reprendre les efforts horizontaux longitudinaux et maîtriser les déplacements longitudinaux.

Exemples de schémas satisfaisants

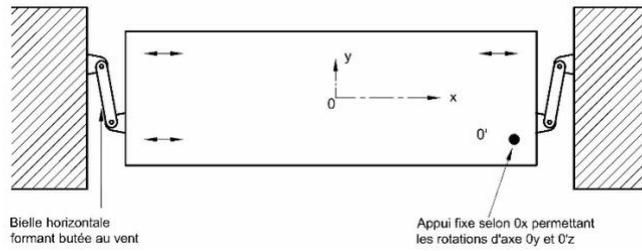


Figure 7.25 : Système d'appui incluant deux bielles horizontales et un appareil d'appui fixe

Sur le schéma ci-dessus, la bielle de droite pourrait être remplacée par une fonction de butée transversale donnée à l'appui fixe. L'appui fixe doit laisser libres les rotations autour d'un axe vertical.

Les bielles verticales ne constituent habituellement pas un appui au vent car leur faible capacité en flexion transversale l'interdit. Elles ne créent pas non plus d'encastrement au vent car elles laissent libre la rotation autour d'un axe vertical, du fait des jeux et de leur souplesse en torsion.

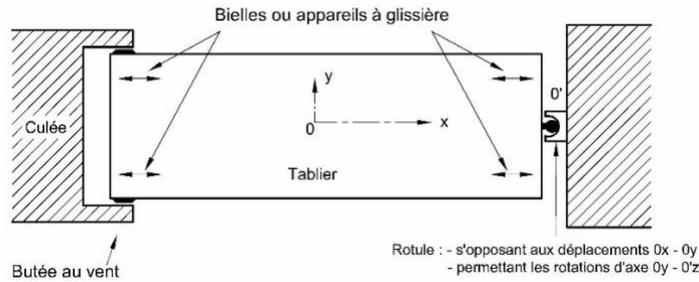


Figure 7.26 : Système d'appui incluant une bielle verticale et des butées au vent

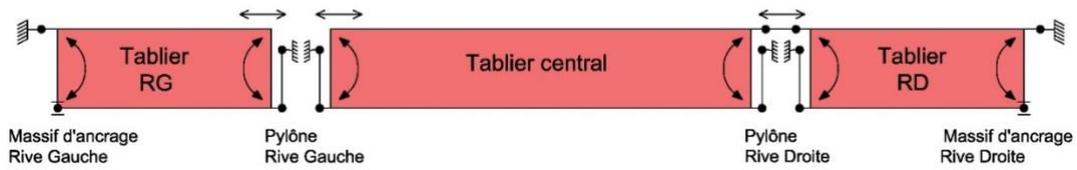
À droite, l'appui fixe longitudinal assure la butée au vent mais laisse libres les rotations du tablier dans les plans horizontal et vertical.

Le cas particulier du pont d'Aquitaine à Bordeaux

Sur le pont d'Aquitaine, les pylônes sont souples et le tablier est à une hauteur d'environ 50 m. Les concepteurs ont décidé de fixer longitudinalement le tablier sur les culées-massifs d'ancrage afin de ne pas exercer de réaction horizontale longitudinale importante sur les pylônes. Le tablier central est donc attelé par une bielle horizontale au tablier de la rive droite.

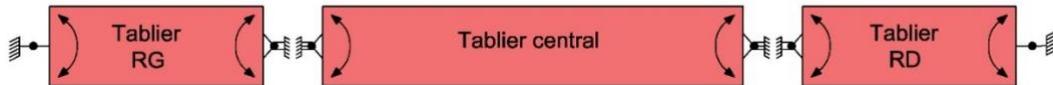
Elévation

- Appuis verticaux
- Ponts Fixes longitudinaux



Vue en plan

- Appuis au vent



Figures 7.27 et 7.28 : Schéma de fonctionnement des appuis du pont d'Aquitaine

Sur les culées (voir figure de gauche ci-dessous), on trouve un appui fixe longitudinal ayant aussi la fonction d'appui au vent. Les réactions verticales sont transmises par des appuis à glissière permettant un débattement longitudinal et donc la rotation du tablier dans le plan vertical.

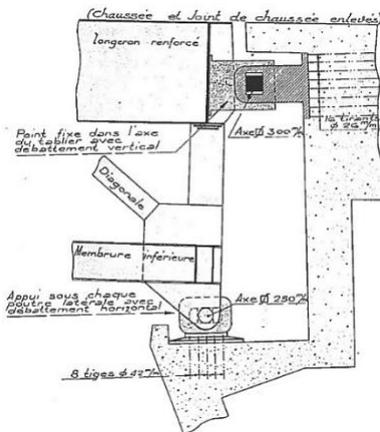


Figure 7.29 : Appuis sur culées du pont d'Aquitaine

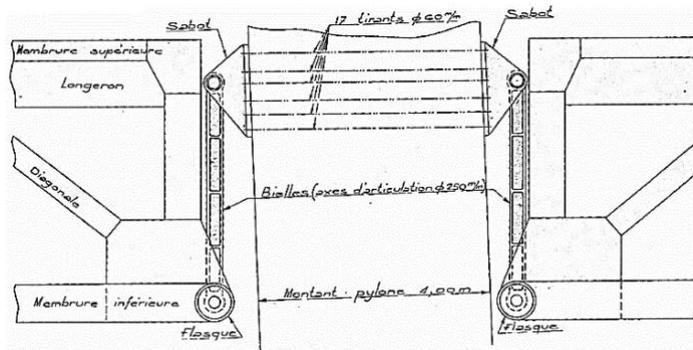


Figure 7.30 : Appuis sur pylônes du pont d'Aquitaine

Sur les pylônes (voir figure de droite ci-dessus), les réactions verticales sont transmises au tablier par des bielles et des butées au vent autorisent les déplacements longitudinaux et les rotations dans toutes les directions.

Entre le tablier central et le tablier de la rive droite, une bielle horizontale d'attelage permet de fixer longitudinalement la travée centrale sans apporter d'effort longitudinal significatif sur les fûts de pylônes (voir figure ci-dessous).

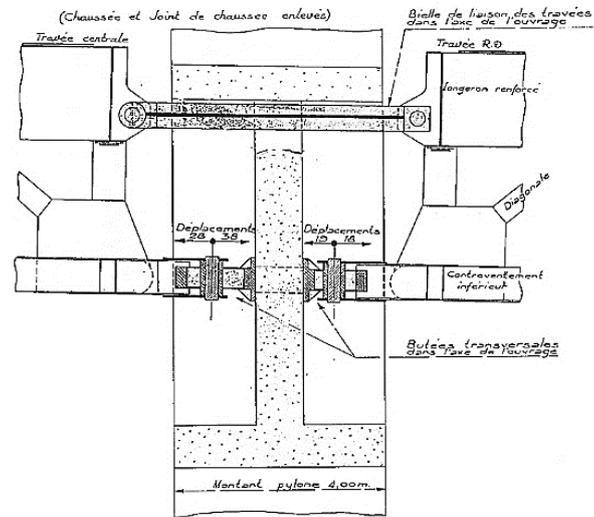


Figure 7.31 : Bielle horizontale d'attelage du tablier central et du tablier de la rive droite

Annexe 8 - Protection anticorrosion des suspensions

Éléments généraux

À l'origine, les câbles étaient protégés de la corrosion par des systèmes de peinture composés de produits noirs. La protection, basée sur un effet de 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 ou inexistant.

Dans les années 60-70, des produits à base de brai de houille ont été introduits. La flexibilité du brai était alors particulièrement intéressante, mais par température élevée, ce 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), on utilise régulièrement des systèmes bitumineux à haute viscosité.

Sur les ouvrages les plus récents, soit depuis les années 1980, les fils constitutifs des câbles sont galvanisés individuellement avant mise en peinture ou avant mise en place d'un système de déshumidification. On note que l'utilisation de câbles galvanisés protégés par une gaine en polyéthylène haute densité (PEHD), très répandue dans les grands ouvrages en béton précontraint, impose un culottage à la résine ce qui, pour les câbles porteurs, pose des difficultés d'attache des suspentes.

Préconisations du fascicule 56 du CCTG de février 1986

L'ancien fascicule 56 du CCTG de février 1986 prévoyait des durées de garantie (durée de l'anticorrosion, aspect, couleur) pour les câbles. Les principes de protection prévus étaient les suivants :

- câbles neufs : ils devaient être galvanisés (350 g/m² mini ~50 µm), décapage de niveau DS 3 des zones endommagées et dégraissage de la galvanisation. Systèmes de types A (homologués par la commission interministérielle – l'homologation LPC, remplacée ensuite par l'homologation ACQPA) ou B (batterie d'essais sans homologation) ;
- câbles existants constitués de fils clairs ou galvanisés: fils clairs : décapage DS 3 de la totalité de la surface, fils galvanisés: décapage DS 3 des zones endommagées et avivage général du reste.

Ce document prévoyait aussi certaines dispositions pour les câbles à fils parallèles ou les torons utilisés individuellement ou en faisceau.

Câbles neufs

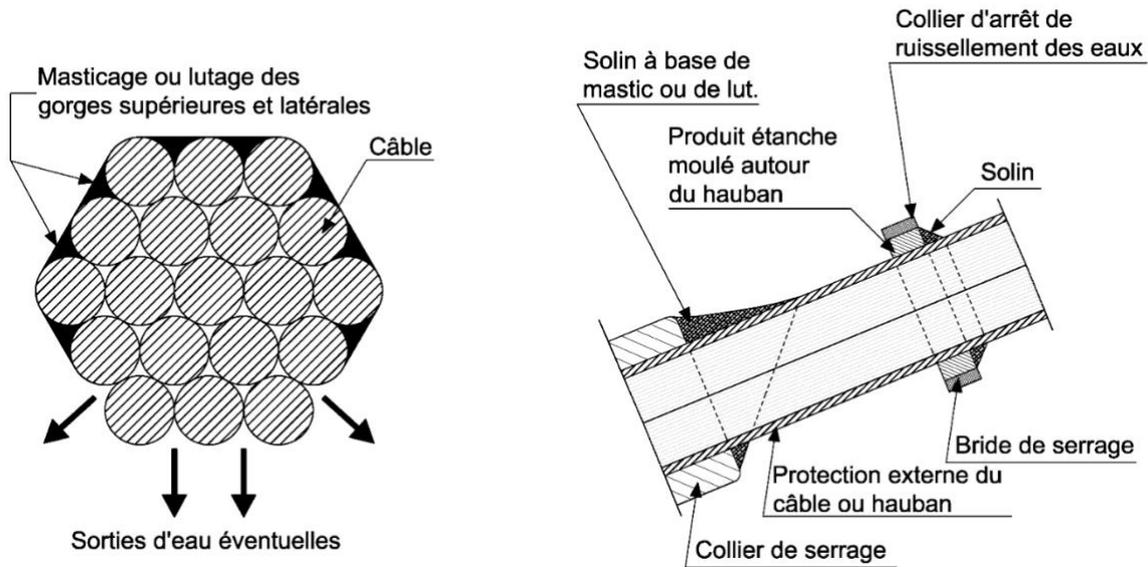
Tous les fils doivent être galvanisés. En cas de dégradation ou de destruction de la galvanisation en cours de travaux, les zones endommagées doivent être recouvertes d'un produit riche en zinc.

Dans le cas de câbles individuels, il est prévu une protection interne par remplissage des vides et des interstices entre fils (produit d'enduction ou peinture) et une protection externe par peinture.

Dans le cas de faisceaux de câbles, un lut ou un mastic est utilisé pour l'obturation des gorges entre câbles. Un système de peinture est par ailleurs mis en œuvre sur les câbles extérieurs et le mastic.

La préparation de surface peut comporter un nettoyage, un décapage et un dépoussiérage.

L'usage de produit de dérochage est interdit à cause du risque d'infiltration du produit, généralement acide.



Figures 8.01 et 8.02 : Protection d'un câble contre les entrées d'eau

L'intérêt du masticage des faisceaux de torons élémentaires en section courante est controversé. Le masticage était déconseillé dans le guide SETRA-LCPC de 1989 qui indiquait : « L'expérience prouve que cette protection n'est jamais efficace et que, bien au contraire, on a tendance à empêcher l'eau de sortir du faisceau ». Il est impératif dans tous les cas de laisser l'eau sortir du câble.

Câbles existants en fils clairs ou galvanisés

Le système de protection comprend le système de peinture et le mastic ou lut appliqués uniquement sur les fils extérieurs des câbles ou sur les câbles extérieurs des faisceaux. Les produits doivent être chimiquement compatibles avec les produits en place.

Les préparations de surface prévues sont les suivantes : nettoyage, décapage et dépoussiérage.

Dans le cas du décapage, on met le métal à nu (cas des fils clairs) ou on avive le revêtement métallique (cas des fils galvanisés) en enlevant tout le système de peinture par un balayage léger.

Définition du système anticorrosion

En ce qui concerne la définition du système anticorrosion, peu de documents généraux sont réellement applicables :

- la circulaire n° 88-44 du 3 mai 1988 donnant la liste des systèmes homologués de type A excluait les câbles ;
- l'ACQPA (association pour la certification et la qualification des peintures anticorrosion), créée en 1994, ne semble pas avoir homologué de systèmes pour câbles,
- le fascicule 56 du CCTG de 2004 ne s'applique pas aux câbles. Le groupe de travail auteur de sa rédaction a en effet considéré que la technologie n'était pas suffisamment stabilisée et que les critères de répétabilité n'étaient pas atteints. En outre, les mesures de contrôle prévues ne sont pas applicables aux câbles à cause de la géométrie du support.

Les documents particuliers du marché, notamment le CCTP, doivent donc préciser les exigences que doivent respecter les composants du système.

Ces derniers doivent posséder un certain nombre de qualités :

- une certaine souplesse afin que le produit puisse suivre sans se fissurer les différentes déformations du câble : flexion, torsion, allongement, etc. ;
- 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 deux propriétés liées à la structure des câbles :

- une grande facilité d'application du produit avec un minimum d'exigences relatives à la préparation du support. 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 à la brosse, une application au pistolet conduisant à trop de pertes ainsi qu'à une mauvaise protection de la périphérie et de certaines zones des câbles.

Dans la pratique, le rédacteur du CCTP s'appuiera au maximum sur les prescriptions du fascicule 56 du CCTG : mode d'exécution et recherche de produits certifiés dans d'autres cas mais possédant les qualités d'adhérence de souplesse et de résistance mécanique aux agressions extérieures et aux UV, application à la brosse.

Exemple de protection anticorrosion d'un câble neuf

Dans le cas de câbles neufs, les fils unitaires constitutifs du câble sont galvanisés et le faisceau de torons multicouches est protégé à l'aide du système suivant :

- une couche primaire d'adhérence sur le zinc (40 à 50 μm) : époxy phosphate de zinc ou équivalent ;
- deux couches bitumineuses de 175 μm chacune, soit au total 300 μm .

L'intérêt de la couche primaire fait débat car elle présente difficilement les souplesses requises. Si on décide de ne pas en prévoir, il convient d'être particulièrement attentif au critère d'adhérence sur le zinc du produit retenu pour les couches bitumineuses.

La protection anticorrosion est complétée par un mastic qui limite les infiltrations d'eau car lorsque l'eau pénètre à l'intérieur du câble, elle chemine puis stagne dans des points singuliers ou points bas, ce qui initie la corrosion. Ce mastic est utilisé préférentiellement en point haut. Il convient en effet de permettre à l'eau de sortir du câble en ne mastiquant pas la partie basse des colliers et du câble.

Points singuliers/selles et colliers

La corrosion se développant prioritairement dans les points singuliers, la qualité de leur traitement anticorrosion est fondamentale.

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 successives au moment du montage de la suspension. Par contre, l'intérieur des colliers peut être peint (primaire riche en zinc par exemple) et du zinc peut être apporté au montage sous forme d'une feuille de zinc entre le collier et le câble.

La partie haute et éventuellement les faces latérales des selles et colliers doivent être mastiquées.

Deux options sont possibles :

- le mastic est posé avant la couche de finition ; cette dernière le protège alors des UV en créant un film continu ;
- le mastic est mis en place après la dernière couche.

Dans tous les cas, il convient à la fois d'empêcher l'eau de pénétrer et de ne pas l'empêcher de sortir.

Evolution de la réglementation

La fourniture et la mise en œuvre des systèmes anti-corrosion sont encadrées par le fascicule *ad hoc* du CCTG, le fascicule 56, mais également par trois Codes :

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

Le fascicule 56 du CCTG et l'ACQPA

L'ancienne version du fascicule 56 du CCTG de 1986 traitait de la protection des câbles, mais ce n'est pas 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. Les spécifications correspondantes des marchés doivent donc être fixées directement dans les CCTP. Pour les rédiger, il convient de s'inspirer de la démarche utilisée dans les deux versions du fascicule 56 du CCTG.

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

Les Codes

Les préoccupations concernant la protection du milieu naturel, notamment l'air et l'eau, et la protection des travailleurs sont devenues déterminantes dans le choix et la mise au point des méthodes d'application. L'interdiction de rejet impose un confinement qui expose les travailleurs à un milieu concentré en polluants. Les déchets doivent être gérés, transportés et stockés en fonction de leur toxicité.

La dangerosité de certains produits (plomb, amiante, brai, composés organiques volatiles, etc.) pour les opérateurs et l'environnement a fait cesser l'utilisation de certaines peintures ou limiter l'exposition des travailleurs.

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

La toxicité des peintures peut se manifester immédiatement (toxicité aiguë), mais souvent les effets néfastes ne sont décelables qu'après une longue période d'exposition (toxicité chronique). Pour chaque produit, il est défini une valeur limite d'exposition (VLE) qui correspond à la valeur plafond autorisée pendant une durée de 15 min : son respect permet d'éviter les risques d'effets toxiques immédiats ou à court terme. Il existe également une valeur limite moyenne d'exposition (VME) correspondant à la valeur mesurée ou estimée pendant un poste de travail de 8 h. Son respect permet de protéger les opérateurs des effets toxiques à moyen et long terme. La VME peut être dépassée sur des courtes périodes sous réserve de ne pas dépasser la VLE, lorsqu'elle existe. Dans le cas des peintures au plomb, un suivi médical avec prise de sang est obligatoire.

Le Code de l'environnement rend obligatoire la récupération et la gestion des déchets.

La classification de la dangerosité des déchets constitue un élément indispensable pour déterminer les filières de traitements possibles. Le Catalogue Européen des Déchets (décision de la Commission Européenne 2001/118/CE du 16 janvier 2001) établit une liste officielle de déchets. Le détenteur peut alors identifier la codification et la catégorie de ses déchets. Cette dernière est déterminée par la concentration de certaines substances toxiques, corrosives, irritantes ou encore cancérigènes.

Ces évolutions ont un fort impact sur les coûts.

Nouvelles techniques

Il est apparu récemment de nouvelles techniques en matière de renouvellement ou de maintenance des systèmes de protection anticorrosion :

- le décapage à l'eau ultra haute pression (UHP) : il permet de remplacer le décapage à l'abrasif mais il charge le câble en eau ce qui n'est pas favorable ;
- la déshumidification des câbles.

L'annexe 10 qui suit développe abondamment ce dernier point.

Annexe 9 - Déshumidification des câbles

La déshumidification des câbles principaux fait partie des réponses à la protection anticorrosion des câbles. Le décapage des peintures utilisées (parfois toxiques) pose problème pour la récupération et le traitement des déchets (aspect environnemental) et pour les conditions d'hygiène et de sécurité pour les opérateurs. De plus, la structure des câbles limite l'efficacité technique de la protection par peinture.

Historique

La déshumidification des câbles des ponts suspendus est une technologie récente :

- la déshumidification est utilisée depuis les années 1960 pour les poutres caissons et les chambres d'ancrage des ponts suspendus où la peinture et les remises en peinture sont délicates. Cette technique s'est avérée efficace et a donc été étendue avec succès aux câbles porteurs des ponts suspendus ;
- en 1998, les câbles porteurs du pont d'Akashi-Kaikyo au Japon sont équipés pour la première fois de ce système. Dix ans plus tard, les câbles ont été ouverts pour une inspection visant à vérifier l'efficacité du système de déshumidification. Les câbles étaient secs et les fils étaient dans le même état qu'au moment de la construction ;
- en 2001, Baudin-Châteauneuf équipe pour la première fois un pont français de ce système, le pont de Belleperche (82) ;
- en 2003, le pont du Little Belt au Danemark est équipé d'un système de déshumidification des câbles, les caissons du tablier étant eux déshumidifiés depuis 1970. Durant cette même année, le pont d'Aquitaine est équipé de ce système ;
- en 2014, un système de déshumidification des câbles est installé sur le pont d'Ancenis.

Ainsi, en 2010, pas moins de 20 à 30 ponts suspendus étaient équipés de ce système dont une douzaine de ponts japonais.

Cette technologie concerne principalement les ponts de grande taille et semble être une solution très intéressante pour ces ouvrages. L'investissement y est en effet faible au regard du coût de construction et réduit significativement la maintenance et le suivi nécessaires. Elle ne peut s'appliquer qu'aux câbles en faisceaux de torons élémentaires ou aux câbles à fils parallèles.

Principe d'action de la déshumidification

Les câbles des ponts suspendus sont soumis à la corrosion atmosphérique. Cette corrosion est liée à l'atmosphère et à ses conditions de températures naturelles. Une des spécificités de cette action est le changement des conditions climatiques selon la météorologie ou les saisons : variations de la température, du taux d'humidité, des UV, du vent par exemple.

La corrosion dans les câbles métalliques ne se produit qu'en présence d'oxygène et d'eau et lorsque le pourcentage d'humidité relative HR dépasse une certaine valeur. Cette corrosion est dite aqueuse et c'est la forme de corrosion la plus fréquemment rencontrée en construction métallique (d'autres formes de corrosion peuvent se manifester dans des conditions particulières). Il existe un lien direct entre le taux d'humidité présent dans l'air et la propagation de la corrosion comme le montre la figure ci-dessous :

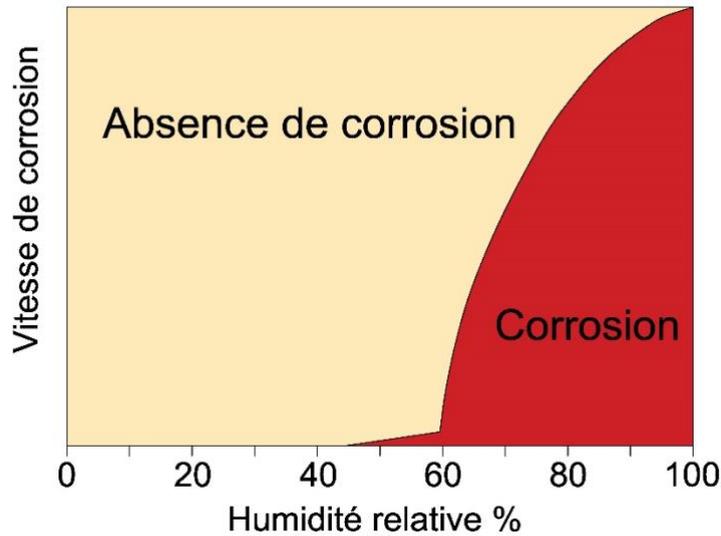


Figure 9.01 : Diagramme donnant la vitesse de corrosion en fonction du taux d'humidité relative

Comme on peut le voir sur le diagramme ci-dessus, le taux d'humidité relative a une grande influence sur la vitesse de corrosion :

- en dessous de 40 %, la vitesse de corrosion est nulle ;
- entre 40 et 60 %, la vitesse de corrosion est très faible ;
- au-dessus de 60 %, la vitesse de corrosion est importante.

Le principe de la déshumidification consiste à placer les câbles à l'intérieur d'une gaine étanche à l'air et à l'eau dans laquelle on injecte de l'air suffisamment sec pour la corrosion ne puisse pas survenir (cas des ouvrages neufs). Dans le cas des ouvrages anciens, l'air sec capte l'humidité qui règne autour et dans le câble et l'évacue vers l'extérieur. La corrosion se trouve ainsi stoppée ou du moins fortement ralentie.

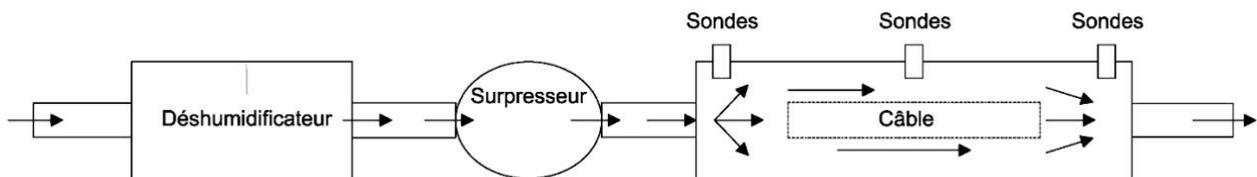


Figure 9.02 : Principe d'un système de déshumidification

Le plus souvent, la valeur de 40 % est retenue comme taux d'humidité à ne pas dépasser dans la gaine.

Le système de protection traditionnel par peinture empêche théoriquement le contact entre le câble et l'humidité, mais son vieillissement diminue progressivement son efficacité. La déshumidification est théoriquement plus efficace car elle empêche l'apparition de l'humidité et la légère surpression à l'intérieur de la gaine compense les défauts d'étanchéité tant que ceux-ci restent modérés.

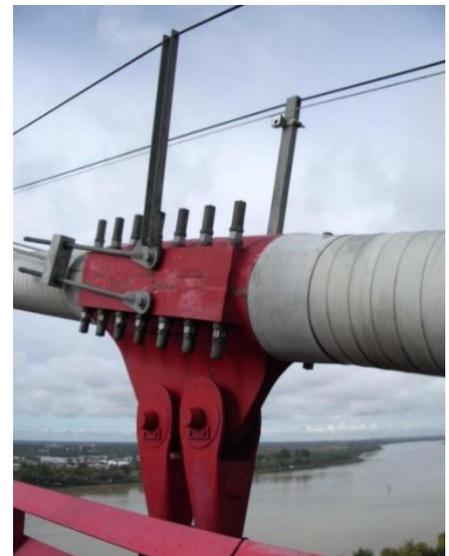
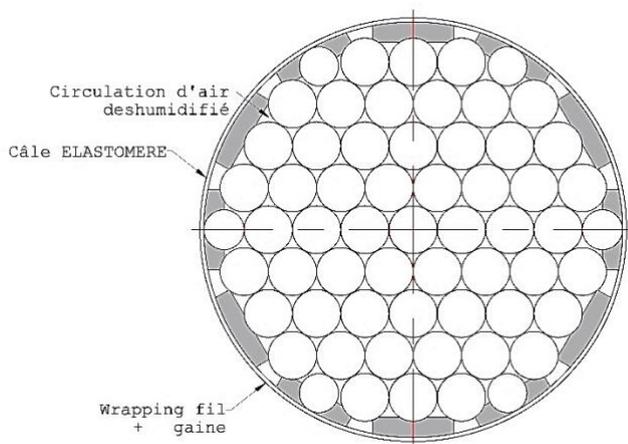
Composition d'une installation de déshumidification

Une installation de déshumidification comporte les éléments suivants :

- un wrapping, c'est-à-dire un enveloppement du câble par un fil galvanisé ;
- une gaine étanche ;
- des déshumidificateurs ;
- des points d'entrée de l'air sec ;
- des points de rejet de l'air humide ;
- des sondes (température hygrométrie, pression) ;
- un système de monitoring ;
- des boîtes de dépôt de fils témoins ;
- des fenêtres d'inspection (éventuel).

Le wrapping

Le wrapping est un bobinage des câbles qui consiste à envelopper le câble de suspension d'un fil en acier doux galvanisé à chaud. Il est issu de la technologie des câbles à fils parallèles pour lesquels il est utilisé systématiquement. Dans le cas de faisceaux de torons élémentaires, on peut théoriquement envisager sa suppression. Des installations sont actuellement effectuées avec une gaine enroulée sur des cales appuyées sur les torons élémentaires. La déshumidification peut s'employer sur des câbles à fils parallèles, largement utilisés aux USA et dans les pays anglo-saxons, ou sur des faisceaux de torons élémentaires. Dans ce dernier cas, des cales s'appuient sur les torons extérieurs afin que la gaine puisse être enroulée sur un cylindre. La gaine est thermo soudée et légèrement tendue sur le câble. Des cales en zinc sous les colliers et en PEHD en section courante permettent d'avoir une section extérieure circulaire.



Figures 9.03 et 9.04 : Dessin et photo du wrapping d'un câble porteur – À droite, le pont d'Aquitaine

La gaine

Une gaine étanche à l'air et à l'eau a été mise autour des câbles. Cette gaine est composée d'une bande élastomère de 200 mm de largeur et 2 x 1,1 mm d'épaisseur, mise en place avec un enrouleur avec un recouvrement de 50 %. Elle est ensuite thermo-soudée à l'aide d'une couverture chauffant entre 115 et 150 °C. La gaine doit pouvoir résister à une pression de quelques kPa.

Les déshumidificateurs

Les déshumidificateurs enlèvent une certaine quantité de l'eau présente dans l'air extérieur sous forme de vapeur avant de l'envoyer dans la gaine. Cette action est réalisée par une roue déshydratante située au centre du déshumidificateur et faisant passer l'air dans des canaux étroits et parallèles. Cette roue est constituée d'un matériau composite hygroscopique, c'est-à-dire qui absorbe l'humidité, le plus souvent du chlorure de lithium. Elle tourne lentement afin que l'air à traiter rencontre toujours une surface sèche, ce qui permet une déshumidification en continu.

La roue est divisée en secteurs isolés exposés à différents flux d'air, ce qui permet un équilibrage précis des débits d'air de déshumidification, de purge, de régénération et de récupération de chaleur.

Le flux d'air utilisé pour régénérer la roue est d'abord chauffé pour obtenir une différence de température de 95 °C entre l'air de régénération et l'air d'entrée. Il passe ensuite à travers le secteur le plus petit de la roue, dans la direction opposée à celle du flux d'air à traiter, évapore l'humidité de la roue et s'échappe de la roue déshydratante comme air chaud et humide.



Figure 9.05 : Exemple de déshumidificateur

À la sortie du déshumidificateur, l'air sec est ensuite envoyé dans le câble et circule dans les espaces vides du câble ou du faisceau de câbles.

Points d'entrée de l'air sec et des points de rejet de l'air humide

La disposition et le nombre de points d'entrée et de rejet est un des éléments clés du dimensionnement du système. L'air sec est amené dans la gaine par un système de tuyauterie. L'air se charge en humidité à son passage dans la gaine et est ensuite rejeté au niveau des points d'extraction situés en avant des bouchons. Ces derniers sont obtenus par des cales qui obstruent les espaces entre câbles et obligent l'air humide à sortir.

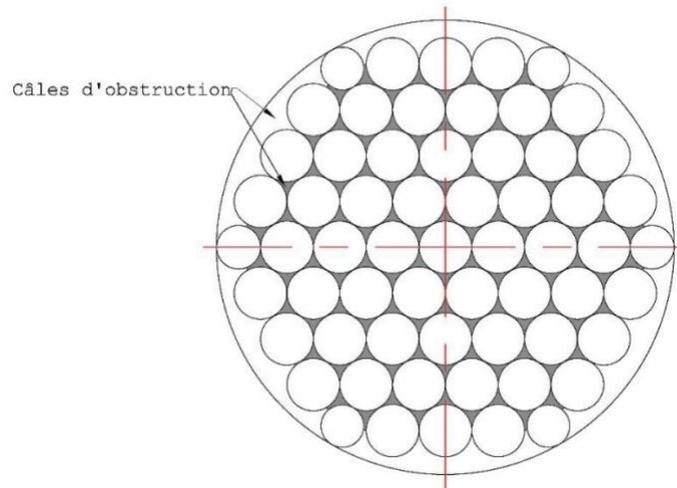


Figure 9.06 : Principes d'une section d'obstruction

Sondes de température, d'hygrométrie et de pression

Les données des capteurs sont indispensables au contrôle et à la régulation du système lors des phases d'installation et d'exploitation. Leur nombre et leur disposition doivent être étudiés en amont. La fiabilité de la mesure et sa précision sont importantes dans la mesure où ces paramètres constitueront les seuls éléments permettant de connaître les conditions à l'intérieur de la gaine. Dès le choix des capteurs, il faut prendre en compte les problèmes de remplacement et d'étalonnage.



Figures 9.07 et 9.08 : Exemples de sondes disposées sur le pont d'Aquitaine

Monitoring

Le monitoring est le système informatique qui permet le contrôle et la régulation du système grâce à l'ensemble des données des différents capteurs. Afin de limiter les consommations d'énergie, il existe des seuils de régulation :

- un seuil bas : si l'humidité relative est inférieure à 25 %, le déshumidificateur s'arrête ;
- un seuil haut : si l'humidité relative est supérieure à 35 %, le déshumidificateur se met en marche.

Le monitoring doit pouvoir enregistrer tous les paramètres de contrôle (température, humidité relative, pression) et envoyer des alertes en cas de problèmes matériels (déshumidificateurs, capteurs) ou de valeurs hors des plages de tolérance. L'objectif est d'avoir une hygrométrie inférieure à 40 % sur une année et inférieure à 50 % sur 24 h.

Fenêtres d'inspection

Les câbles ne sont pas visibles et très 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 des trappes de visites afin de vérifier visuellement l'état des câbles.

Boîtes de dépôt de câbles témoins

Il est possible d'installer des boîtes contenant des câbles témoins juste avant le point d'extraction. Ces câbles témoins y sont conservés dans les mêmes conditions que le câble à l'intérieur de la gaine et peuvent être extraits facilement pour subir des inspections et des essais.

Description du système de déshumidification du pont d'Aquitaine

La protection anticorrosion des câbles installée sur le pont d'Aquitaine est basée sur quatre éléments :

- tous les fils unitaires composant chacun des câbles sont galvanisés à chaud ;
- un wrapping enveloppe le câble de suspension d'un fil en acier doux galvanisé à chaud (3,5 mm de diamètre) en s'appuyant sur des cales en PEHD qui s'appuient elles-mêmes sur les torons extérieurs afin que la gaine puisse être enroulée sur un cylindre ;
- une gaine étanche à l'air et à l'eau protège les câbles ;
- un système de contrôle et de régulation basé sur des sondes déshumidifie les câbles.

Éléments de réglage et de dimensionnement sur les câbles à fils parallèles provenant du retour d'expérience à l'étranger

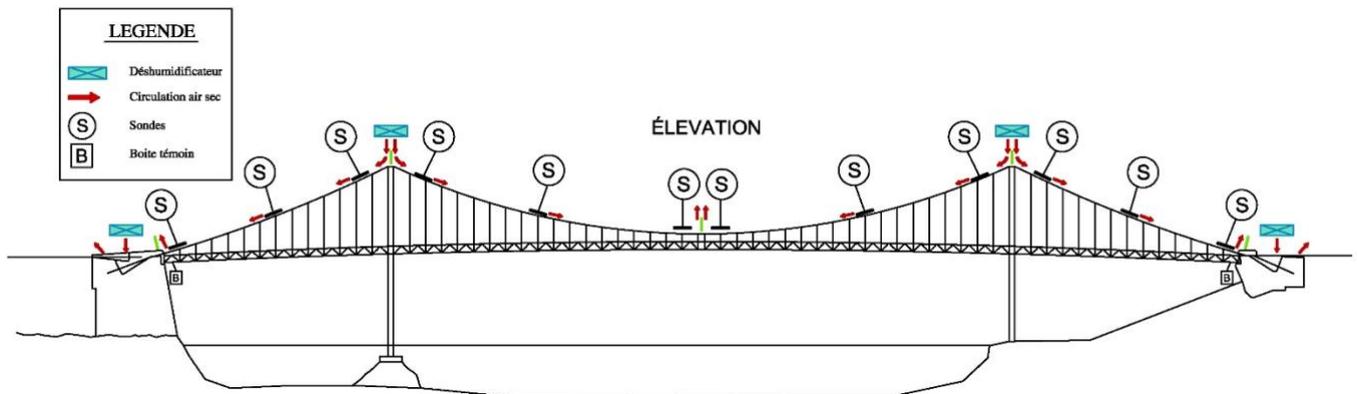


Figure 9.09 : Disposition des principaux composants d'un système de déshumidification

Les éléments principaux pour le dimensionnement sont les suivants :

- la capacité de déshumidification de l'air : les déshumidificateurs doivent être capables d'assécher suffisamment l'air. Les volumes à déshumidifier sont calculables. La capacité de déshumidification, validée par des essais chez le fabricant, est fonction des conditions extérieures (HR et T) et sera donc limitée dans le cas d'un environnement trop humide et froid ;
- la pression d'air au point d'injection doit être suffisante pour assurer une légère surpression dans la gaine et ne doit pas être trop forte pour ne pas endommager celle-ci ;
- la perte de charge : il existe une perte de pression, due à la perte de charge, lorsque l'air se propage dans la gaine. Cette perte de charge dépend aussi des pertes d'étanchéité du système au niveau des zones de raccords (ex : raccord collier/gaine). Elle constitue un élément intrinsèque à chacun des systèmes de déshumidification et s'avère donc difficilement quantifiable. La porosité est importante mais le volume à assécher reste modéré. De cette perte de charge va dépendre la distance entre les points d'injection et les points de rejet.

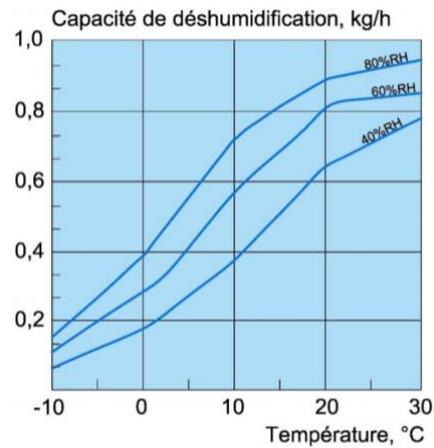


Figure 9.10 : Capacité de déshumidification en fonction de la température et de l'humidité relative

Il n'existe aucune règle pour le dimensionnement d'un système de déshumidification. Celui-ci est basé sur l'expérience et sur des essais de réglage et il est donc essentiel d'avoir la possibilité d'ajuster le système même pendant l'exploitation :

- longueur maximale entre deux injecteurs : entre 200 et 300 m ;
- surpression au point d'injection : 2 à 3 kPa ;
- débits aux points d'injection : de 0,25 à 1,5 m³/min selon le diamètre du câble ;
- vitesses moyennes de déplacement d'air généralement inférieures à 0,5 m/s.

Sur les faisceaux de câbles élémentaires toronnés, le nombre de références est aujourd'hui très faible mais il semble que les dispositifs de déshumidification soient dimensionnés avec des surpressions et des vitesses moyennes d'écoulement de l'air plus importantes.

Ce type de protection ne peut être envisagé que sur les câbles à fils parallèles ou en faisceau de torons élémentaires. L'installation doit être correctement étudiée, réalisée avec soin et monitorée. La maintenance est lourde et doit être prévue dès l'installation.

On constate généralement que les câbles composés de torons sèchent plus vite que les câbles composés de fils parallèles : ils ont en effet plus de vides et leurs cheminements internes sont plus ouverts.

L'efficacité du système de déshumidification, surveillée sur plusieurs ponts, peut varier de manière significative selon le type de câbles, selon la quantité d'eau accumulée dans les câbles et selon le climat local.

Annexe 10 - Mécanisme de dégradation des câbles

Les câbles pour ouvrages d'art sont constitués de fils élémentaires au carbone (teneur voisine de 0.7 % pour les câbles modernes) et manganèse dont les caractéristiques mécaniques sont obtenues par tréfilage après patentage, c'est-à-dire traitement thermique, d'un fil machine.

Les fils machine ont une forme cylindrique obtenue par laminage à chaud et un diamètre voisin de 10 mm.

Le diamètre des fils utilisés dans les câbles de pont est compris entre 3 et 6 mm. Le fil est donc fabriqué à partir du fil machine soit par tréfilage à température ambiante, soit par un autre laminage à chaud, le laminage à chaud étant alors suivi d'une trempe, c'est-à-dire d'un refroidissement rapide.

Méthodes de fabrication des fils

Le tréfilage

Un fil machine a une structure métallographique difficile à tréfiler, c'est pourquoi un traitement thermique, permettant à l'acier d'être formé de petits grains de perlite, lui est appliqué avant le tréfilage. Pendant la réduction de section, la résistance mécanique augmente par écrouissage et orientation des grains.

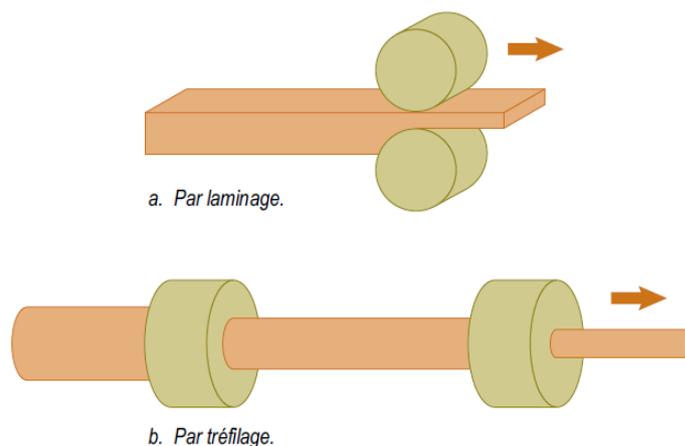


Figure 10.01 : Principes des réductions de section

Pour que l'allongement sous charge maximale reste assez élevé ($> = 6 \%$), il convient de limiter cette résistance à une valeur inférieure à 2100 MPa.

Des ruptures peuvent se produire en usine lorsque les conditions de tréfilage ne sont pas compatibles avec les structures de patentage ou la propreté interne de l'acier. De très petites décohésions peuvent aussi se créer à l'interface entre les inclusions non métalliques et les constituants métalliques.

Traitements thermiques après laminage à chaud

Après un simple laminage à chaud, l'acier n'a pas les caractéristiques mécaniques adéquates pour les câbles. La trempe provoque un changement de structure et permet de donner aux aciers des limites d'élasticité suffisantes, proches de 1000 MPa. Pour les aciers à teneur en carbone élevée, la température de trempe est voisine de 950 degrés et le milieu de refroidissement est soit une huile chaude soit un bain de plomb ou de sels fondus. Lorsque les résultats de la trempe le nécessitent, un traitement de revenu par chauffage à 400 degrés est appliqué pour redonner des capacités plastiques au matériau.

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 quelques cycles de chargement (fatigue).

Défauts possibles sur les aciers trempés

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

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

Fabrication des torons élémentaires

Dans les câbles modernes, les fils sont galvanisés c'est-à-dire revêtus de zinc ou d'un 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 (fil galvanisé en terminal) ou entre deux opérations de tréfilage (fil galvanisé retréfilé).

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 donner une surface extérieure lisse. Ces fils de section rectangulaire, trapézoïdale ou en Z, sont mis en forme par des galets après un tréfilage préliminaire.

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 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.

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

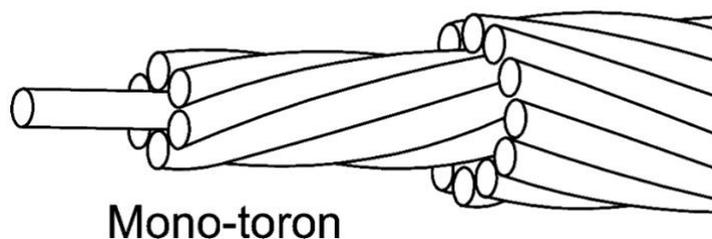


Figure 10.02 : Principe constitutif d'un monotoron

Mécanismes de dégradation des câbles

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.).

Dans un environnement humide, ce processus est un processus électrochimique de dissolution du métal sous forme de cations dans l'eau. Ces ions métalliques s'associent aux ions présents dans le milieu aqueux pour former des sels ou des hydroxydes sous forme d'un dépôt de produits de corrosion appelé communément rouille.



Figure 10.03



Figure 10.04



Figure 10.05

La figure 10.03 représente, sur le toron supérieur, une dissolution généralisée sous forme d'une plaque affectant plusieurs fils jointifs (mise en évidence par grenailage).

La figure 10.04 représente une dissolution généralisée sous mastic entre deux torons (plaques et cratères de dissolution à proximité du mastic).

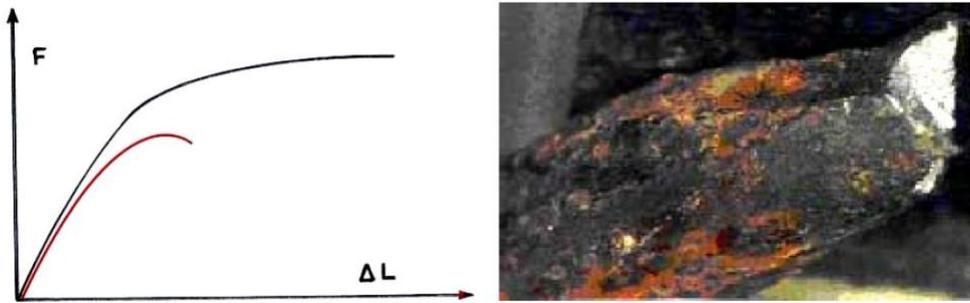
La figure 10.05 représente la dissolution généralisée de la couche externe de fils. Le gonflement dû aux produits de corrosion de la couche inférieure et la perte de diamètre par corrosion des fils génèrent un espacement entre fils.

Ces phénomènes se localisent principalement dans les zones d'accumulation d'eau et de mauvaise ventilation.

Les conséquences sont une perte de charge à rupture et une perte d'allongement à la rupture.

Corrosion par piqures et crevasses

La formation de piqures 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 cavernieuse 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.).



Figures 10.06 et 10.07 : Courbes de traction d'un fil sain (en noir) et d'un fil présentant un cratère de corrosion (en rouge)

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. L'hétérogénéité qui crée une pile électrochimique entre deux zones peut provenir du milieu environnant. Lorsque le rôle de l'oxygène est majeur, on parle de corrosion par aération différentielle.

Dans le cas de matériaux différents, le matériau le moins noble, le potentiel de corrosion le moins élevé, devient l'anode et le matériau le plus noble la cathode. Les paramètres d'influence sont la différence de potentiel, les caractéristiques du milieu environnant et la relation géométrique entre les pièces. Par exemple, la mise en contact de l'acier avec le zinc de la galvanisation dans un milieu type eau stagnante peut conduire à la corrosion du zinc. Les produits de corrosion du zinc peuvent créer une forme de corrosion par crevasse, ou cellule de corrosion occluse, conduisant à une corrosion localisée de l'acier.

Ce processus n'a pas été observé pour les câbles anciens composés de fils clairs. Par contre, l'utilisation de revêtements de zinc au contact des aciers nus des aciers des colliers ou des ancrages peut conduire à une corrosion de l'acier. Les deux photographies de la figure suivante montrent l'effet du couplage du revêtement de zinc avec l'acier des clavettes et du bloc d'ancrage utilisé.



Figures 10.08 et 10.09 : Effets du couplage zinc/acier à proximité d'un ancrage

Dans ce cas, le film résiduel de cire n'a pas évité le phénomène de dissolution locale. (Le film a peut-être été détruit avant la formation de la pile fer/zinc ou n'est pas assez protecteur en couche mince).

Une attention particulière doit également être portée sur les douilles d'ancrage des câbles multicouches galvanisés dont le culottage est réalisé en résine synthétique chargée. Si ces douilles ne sont pas elles-mêmes galvanisées au trempé, la formation d'un couplage électrochimique fer/zinc pourra engendrer des dissolutions locales des fils d'autant plus facilement que les torons ne sont pas toujours remplis de produit de colmatage.

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.

Nous décrivons dans ce qui suit le mécanisme local de formation et de progression de la fissure.

La phase d'amorçage correspond à une corrosion localisée (par piqures, crevasses, galvanique) comme déjà évoquée. En absence d'oxygène (milieu confiné), l'hydrolyse des ions métalliques conduit à la production d'ions hydrogène dont une partie diffuse dans l'acier et se concentre dans les zones microstructurales de forte contrainte (fragilisation par hydrogène). Dans ces zones s'amorce alors une fissure en pointe de défaut.

Une fois amorcée, la fissure se propage par sauts successifs à l'échelle du défaut. Pour expliquer cette propagation, on peut considérer l'existence d'une interaction entre plasticité et défauts en pointe de fissure en relation avec l'hydrogène présent, les lacunes créées et la dissolution anodique. Cette propagation de fissure est généralement perpendiculaire à la plus grande contrainte appliquée. Lorsque la fissure atteint une longueur critique, l'éprouvette se rompt de façon fragile car la valeur du facteur d'intensité de contrainte correspondant à la contrainte appliquée devient supérieure au facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC}.

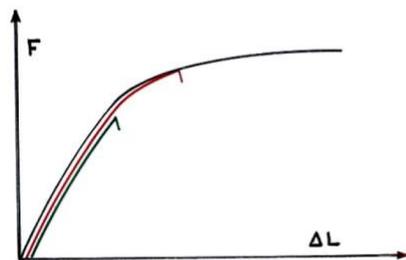
La partie courante des câbles ne devrait donc pas être affectée par ce phénomène en dehors des hétérogénéités métallurgiques locales (inclusions non métalliques) de taille supérieure aux maxima normatifs. Ce type de défaut peut exister au regard de la longueur de fil utilisé sur un même câble (plusieurs kilomètres voire des dizaines de kilomètres).

Par contre, les parties des câbles situées près des ancrages ou au contact de pièces mécaniques massives ou encore les zones de contact entre fils de couches successives sont soumises à des contraintes de traction supérieures à la contrainte moyenne de traction dans le câble. On peut alors dépasser localement un seuil de contrainte et observer des ruptures sans perte de section. Le type de défaut qui peut le mieux être rattaché à ce mécanisme est la rupture de fils des couches internes d'un toron multicouche dans les zones de gonflement victime d'une corrosion interne du câble sans apport d'oxygène.



Figure 10.10 : Ruptures de fils internes à un toron dont la couche externe ne présentait pas de rupture.

La photo ci-dessus montre des ruptures de fils internes dans un toron dont la couche externe ne présentait pas de rupture. Le gonflement du toron et la présence à l'intérieur du câble de magnétite (Fe_3O_4) montrent que le cœur du toron était le siège d'une corrosion en milieu confiné favorable à la formation et à la propagation de fissures de corrosion sous contrainte.



Figures 10.11 et 10.12 : Courbes de traction comparées d'un fil sain et de deux fils affectés par des fissures de profondeurs différentes

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 n'apparaît.

Les surfaces de rupture présentent un aspect fragile et la perte de matière est généralement très faible. Les fissures de fatigue ont les mêmes conséquences.

Il faut enfin remarquer que la cinétique de dissolution généralisée peut empêcher la formation des fissures par le fait que les piqûres peuvent s'élargir de façon importante, conduisant à une corrosion uniforme et non plus localisée (plus de production d'ions hydrogène, abaissement des contraintes en point de défaut).

Mécanismes de ruptures par fatigue

Les câbles de suspension sont soumis à des chargements et 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 contraintes aléatoires (solllicitations dynamiques) dont les conséquences sont celles des chargements en fatigue.

Pour les fils de câbles, de nombreux laboratoires ont effectué des essais de fatigue en traction ondulée ou en flexion rotative qui ont permis d'obtenir une courbe de comportement qui apparaît comme unique pour les fils de 2 à 7 mm de diamètre revêtus ou non de zinc. Cette courbe donne, en fonction de la contrainte moyenne, l'étendue de variation de contraintes pour une rupture à $2 \cdot 10^6$ cycles (Les résultats à contrainte moyenne nulle sont ceux du LCPC).

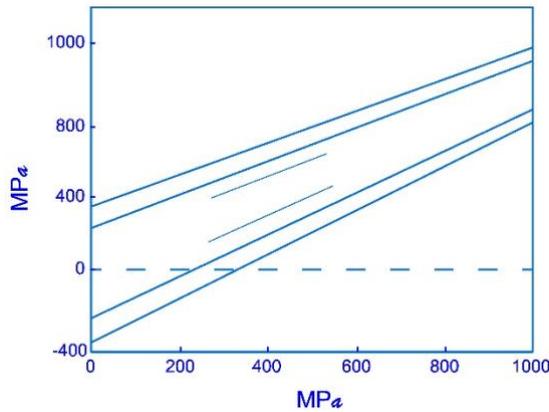


Figure 10.13 : Diagrammes de Goodman

La figure 1013 ci-dessus donne, en fonction de la contrainte moyenne, les étendues de limite de fatigue en traction ondulée pour 2 000 000 de cycles, de fils cylindriques (les deux droites extrêmes), de torons mono-couche de 7 fils (les deux droites intermédiaires) et d'un toron multi-couches (les deux segments centraux).

Pour les fils, les droites sont confondues pour des diamètres de fils compris entre 2 et 7 mm non revêtus ou galvanisés.

On relève sur cette courbe que, pour une contrainte moyenne de 600 MPa, soit environ 30 % de la contrainte à la rupture, l'étendue limite de variation de contrainte est de 550 MPa pour $2 \cdot 10^6$ cycles.

Mécanismes de frottement en petits débattements

Fretting wear / fretting fatigue

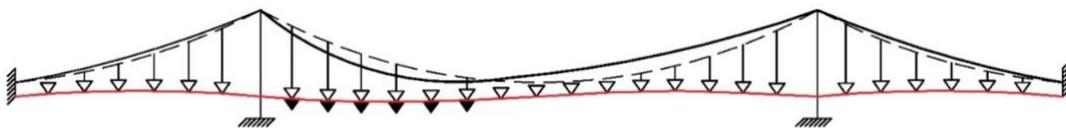


Figure 10.14 : Schéma des déformations subies par un pont à trois travées suspendues au passage d'une charge

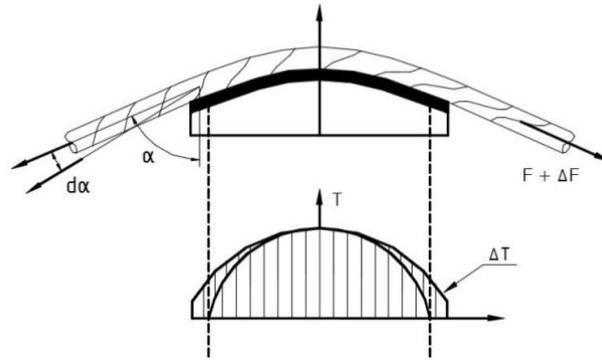


Figure 10.15 : Schéma des variations de contrainte normale, du déplacement relatif epsilon et du glissement dl lors d'une variation de l'effort de traction et d'une variation angulaire

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'appuis (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 qui modifient la contrainte moyenne de sollicitation en fatigue et l'étendue de variation de contrainte entraînant la rupture pour un nombre de cycles déterminé. Le comportement en fatigue apparent d'un câble est donc dégradé par rapport à celui d'un fil unique rectiligne.

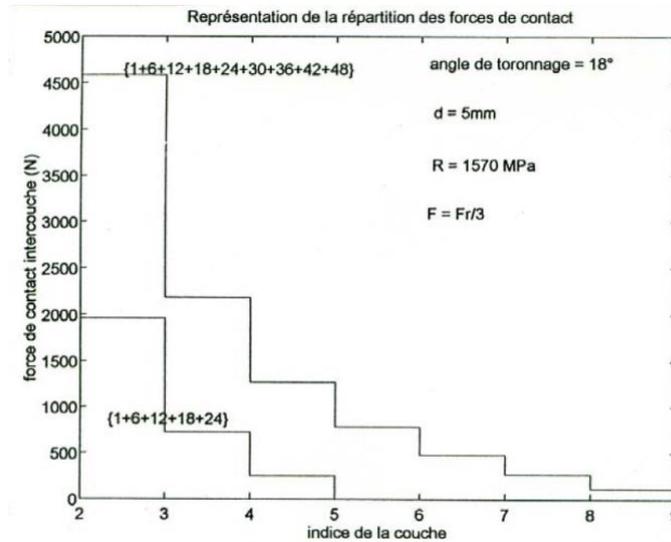


Figure 10.16 : Schéma des forces normales aux contacts inter-couches pour une traction exercée sur le toron égale à 30 % de la charge de rupture

Les résultats expérimentaux pour un toron de 7 fils et sur un toron multi-fils de diamètre extérieur égal à 85 mm montrent que la limite de fatigue à 2 000 000 de cycles est ramenée à 320 MPa pour un toron 7 fils et à 150 MPa pour un toron de 85 mm de diamètre. Cet effet de câblage est très dépendant du pas de toronnage et du nombre de couches (voir figure ci-dessus). Un câble multi-fils parallèles a quasiment la même tenue à la fatigue qu'un fil unique hors zones singulières.

Par ailleurs, pour diminuer les surcontraintes locales sous les contacts des fils, les constructeurs peuvent effectuer un sur-tréfilage ou une pré-plastification par surtension qui conduisent à augmenter les surfaces plastifiées et diminuent d'autant les pressions locales de contact.

L'effet des ancrages sur la tenue à la fatigue des câbles est en partie de même origine.

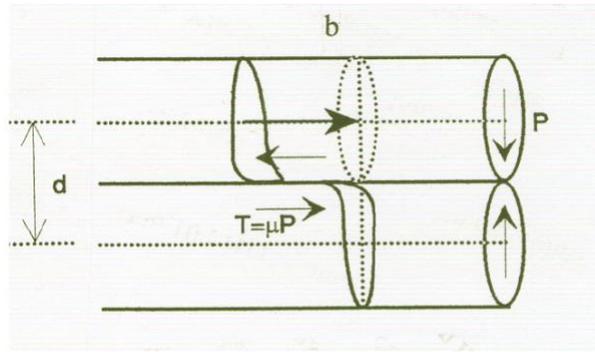


Figure 10.17 : Glissement et déformations élastiques internes aux fils

La figure 10.17 ci-dessus montre le glissement et les déformations élastiques internes aux fils qui participent à la déformation globale du câble. Lorsque la déformation par flexion d'un toron dépasse un seuil, la section droite du câble n'est pas conservée. Les fils de couches successives glissent entre elles lorsque le seuil de glissement ($T = \mu P$) est atteint. Les forces de frottement alternées générées alors sont des sollicitations de fatigue de surface qui produisent des phénomènes d'usure et/ou des phénomènes d'amorçage de fissures de fatigue.



Figure 10.18



Figure 10.19

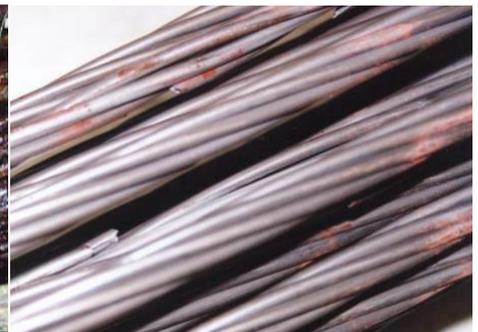
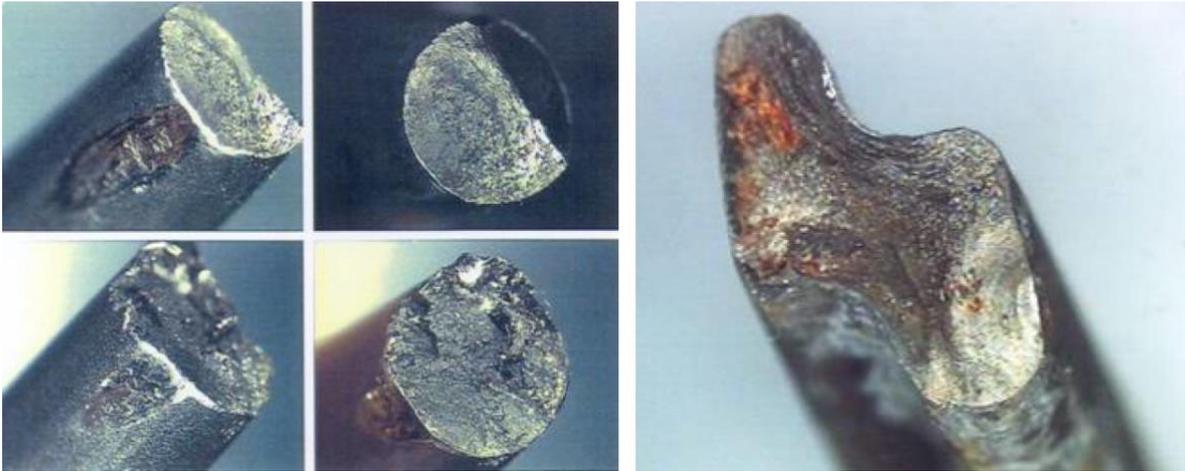


Figure 10.20

La figure 10.18 montre de l'usure et des ruptures de fatigue induites par les frottements en petits débattements sur un câble multi-torons parallèles. La poudre rouge est constituée de particules d'acier oxydées en surface. Les ruptures coïncident à des contacts entre torons de couches successives au niveau du déviateur qui compacte le câble en avant du bloc d'ancrage. Pour les contacts entre fils de couches adjacentes, ce sont les déformations en flexion alternée provoquées par les mises en vibration qui génèrent le plus grand nombre de cycles.

La figure 10.19 représente un toron multicouches dont les fils se sont rompus progressivement de l'extérieur vers l'intérieur par fatigue de contact à l'encastrement dans une douille d'ancrage. La corrosion affectant les fils dont le produit de protection a été brûlé par le culottage au zinc fondu a accéléré le processus à cœur.

La figure 10.20 montre des ruptures et des phénomènes d'usures de torons dus au fretting.



Figures 10.21 à 10.25 : Ruptures initiées par le phénomène de fretting-fatigue

Les figures 10.21 à 10.25 montrent des faciès typiques de ruptures initiées par le phénomène de fretting-fatigue sans synergie avec d'autre processus. L'initiation de la fissure de fatigue est centrée sur l'axe de la surface de contact entre fils ou, entre fil et pièce rigide externe.

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. Le zinc est en effet favorable vis-à-vis de la corrosion mais retarde aussi l'apparition des fissures de fatigue.

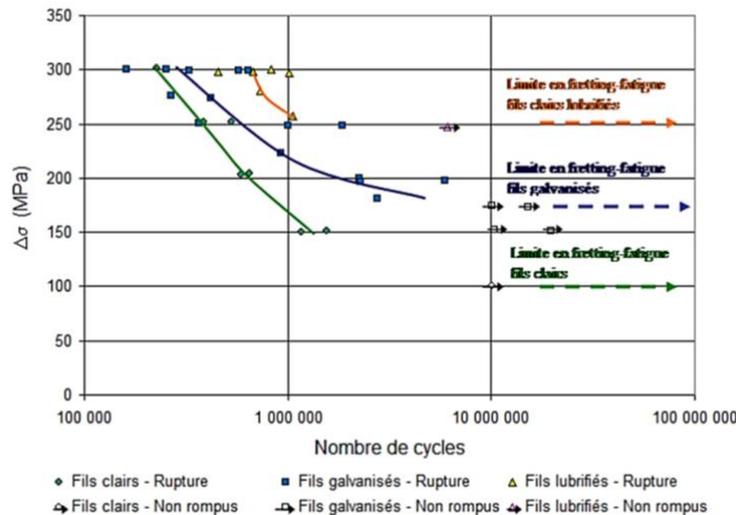


Figure 10.26 : Limites de fatigue et limites d'endurance de fils cylindriques non revêtus ou galvanisés, obtenues expérimentalement

Les résultats sont donnés sous forme de courbes de Wöhler. Ici l'étendue de variations de contraintes à rupture en fonction du nombre de cycles a été établie pour une contrainte moyenne de 600 MPa et une force normale au contact de 200 N.

Combinaison de processus de dégradation

Sur les figures qui précèdent, il est visible que plusieurs processus interviennent assez souvent 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. (La corrosion localisée est généralement la première phase avant la corrosion sous contrainte ou la fatigue-corrosion).

En cas de corrosion uniforme, on trouve rarement de la corrosion sous contrainte.

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



Figures 10.27 à 10.30 : Fils rompus sur des fissures propagées par fatigue mais initiées par des piqûres de corrosion.

Annexe 11 - 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 construits pendant la seconde guerre mondiale ont eu des problèmes de ce type. En 1967, le pont suspendu de Point Pleasant aux Etats Unis s'est effondré à cause d'une rupture en chaîne des barres d'acier constituant les 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. 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. L'effondrement a été initié par des ruptures fragiles d'aciers en barres dans des zones filetées. 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 et notamment le froid ;
- la géométrie extérieure, l'épaisseur et la présence de défauts métallurgiques ;
- la vitesse de chargement.

Lien entre nature des aciers et rupture fragile

Les aciers en barres à l'origine de l'effondrement du pont de Sully-sur-Loire étaient, comme très souvent dans ces ouvrages, des aciers dédiés à la construction mécanique dont les caractéristiques sont garanties après traitement thermique alors qu'ils sont utilisés bruts de laminage. Ces aciers présentent donc dans leur grande majorité des caractéristiques de ténacité (*) médiocres et parfois très faibles. Il a fallu attendre la fin des années 1980 pour que ces pièces, souvent vitales, soient réalisées avec des nuances d'aciers ne présentant pas ce risque, en l'occurrence des nuances d'aciers pour construction métallique.

La ténacité est caractérisée pour les aciers de construction par l'essai de flexion par choc sur éprouvette entaillée défini par la norme NF EN 10045. Couramment dénommé résilience, cet essai remplace dans ce cas pour des raisons d'économie l'essai de mesure directe de la ténacité.

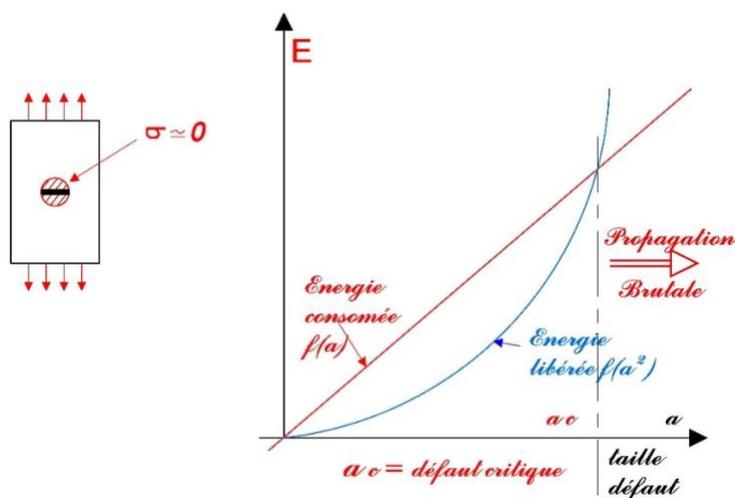
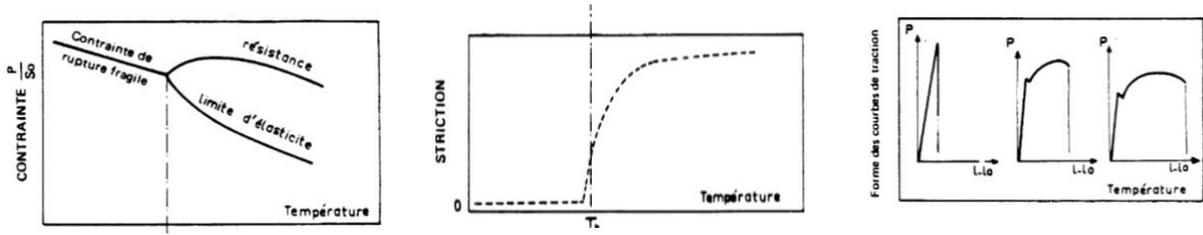


Figure 11.01 : Évolution du risque de propagation brutale d'un défaut en fonction de l'énergie disponible et de la taille du défaut

La présence d'un défaut dans l'élément tendu crée une zone de contraintes faibles. Quand l'énergie ainsi rendue disponible est supérieure à celle nécessaire à la création de surfaces libres dans le matériau, on a une propagation brutale du défaut.

Existence d'une température de transition ductile-fragile

Lors des essais de traction à basse température, on constate que la limite élastique et la résistance augmentent, alors que l'allongement réparti et la striction diminuent. À une certaine température, la résistance est égale à la limite élastique. Au-dessous de cette température, l'éprouvette casse à une contrainte appelée contrainte de rupture fragile.



Figures 11.02 à 11.04 : Représentation schématique d'essais de traction à différentes températures de part et d'autre de la température de transition ductile-fragile (Tt est la température de transition de ductilité)

En fonction de la température, les faciès de rupture sont très différents. La rupture ductile se caractérise par un faciès à nerf alors que la rupture fragile correspond à un faciès à grain ou cristallin.

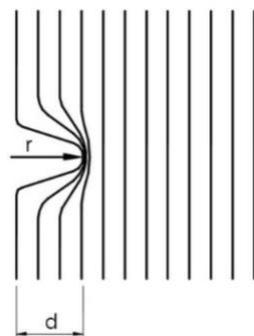
Les principaux facteurs intervenant sur la valeur de la température de transition fragile-ductile sont, pour une nuance d'acier donnée :

- la vitesse de déformation ;
- l'effet d'entaille ;
- l'épaisseur.

Effet d'entaille

Les ruptures fragiles s'initient sur des défauts provoquant des concentrations de contrainte.

La présence d'une entaille entraîne une augmentation de la contrainte à fond d'entaille.



K_T : Facteur de concentration de contrainte

$$K_T = 1 + K$$

$$\sigma = \sigma_{nom} \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{r}} \right)$$

$$r \rightarrow 0 \Rightarrow \sigma_{local} \rightarrow \infty \quad ?$$

Figure 11.05 : Détermination de la contrainte en fond d'entaille

Le coefficient de concentration de contrainte K_t , qui est une grandeur sans dimension (rapport de la contrainte maximale sur la contrainte nominale = $(F/S)+(MV/I)$), ne doit pas être confondu avec le coefficient d'intensité de contrainte K_I , grandeur caractéristique de la mécanique de la rupture qui s'exprime en $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Un trou circulaire dans une plaque provoque un K_t égal à 3.

Dans le cas des barres filetées, on peut utiliser la formule de Peterson rappelée ci-dessous :

K_t : cas des barres Table de PETERSON
DIN 50118 filetage

$$K_t = 1 + \left[\frac{1}{2} * \frac{r_0/d_0}{D/d_0 - 1} + 2 \frac{r_0}{d_0} \left(1 + 2 \frac{r_0}{d_0} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Dans le cas des filetages normalisés, on retient $K_t = 4,8$ et on a donc une plastification en fond de filet.

Conditions de sollicitation des filets

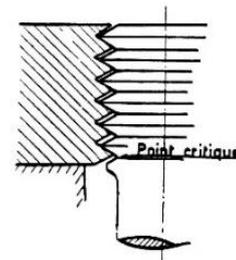
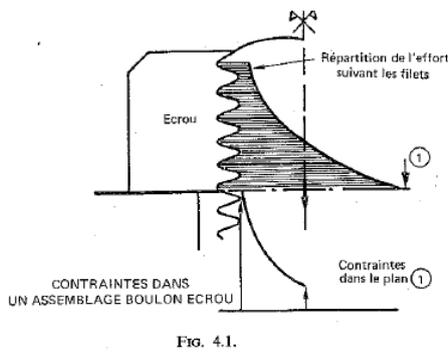


Figure 6 - Point critique de l'assemblage vis-écrou.

Figures 11.06 et 11.07 : Sollicitations en fond de filet d'un assemblage boulonné

Les deux premiers filets reprenant environ 60 % de la charge, la rupture s'initie au premier fond de filet de la barre.

Influence des paramètres métallurgiques

La composition chimique et le traitement thermique lors de l'élaboration des aciers peuvent avoir une influence très marquée sur les températures de transition. Il est cependant difficile d'apprécier l'influence intrinsèque de tel ou tel facteur.

Influence de la taille de grain ferritique

Les aciers à grains fins ont des températures de transition inférieures. La loi de Petch indique que la température de transition varie linéairement en fonction du logarithme de $d^{-1/2}$, d étant le diamètre moyen du grain ferritique.

Tous les facteurs permettant d'affiner le grain ferritique ont donc une importance très favorable sur la résistance à la rupture fragile. On peut citer :

- les éléments formant des précipités qui affinent le grain austénitique, donc le grain ferritique : c'est le cas de l'aluminium, du niobium, du titane... utilisés pour élaborer les aciers modernes ;
- la vitesse de refroidissement : le grain est d'autant plus fin que la vitesse de refroidissement est rapide ;
- le laminage : en jouant sur les paramètres de laminage et notamment la température de fin de laminage, on peut affiner le grain.

Influence de la microstructure perlitique

Pour une même grosseur de grain ferritique, une perlite lamellaire est d'autant plus fragile que ses lamelles sont plus fines. En effet, une microstructure perlitique est moins fragile qu'une microstructure de trempe.

Influence des éléments d'addition en solution solide dans la ferrite

Les éléments gammagènes (Mn, Ni, CO) abaissent les températures de transition alors que les éléments alphas (Cr, Si, Al), en solution dans la ferrite, élèvent cette température. Le guide OTUA « La rupture des aciers, tome 1, la rupture fragile » donne une liste non exhaustive des éléments gammagènes et alphas.

Influence de la teneur en carbone

Le carbone agit de deux manières :

- le fait qu'il est gammagène est favorable ;
- le fait que la teneur en perlite augmente est défavorable.

Il résulte de ces deux effets que lorsque la teneur en carbone augmente :

- les courbes de transition deviennent de moins en moins abruptes ;
- la résilience du niveau ductile s'abaisse ;
- la température de transition est décalée vers les hautes températures.

Éléments de mécanique de la rupture

Concentration de contraintes

Le coefficient de concentration de contraintes, grandeur sans dimension K_t (= contrainte maximale/contrainte nominale) n'est pas directement utilisé en mécanique de la rupture. Par contre, il caractérise l'agressivité du filetage en le comparant par exemple avec le K_t du filetage normalisé. Dès qu'une fissure de fatigue apparaît en fond de filet, la géométrie du filetage n'a pratiquement plus d'influence sur le développement du phénomène.

Coefficient d'intensité de contrainte

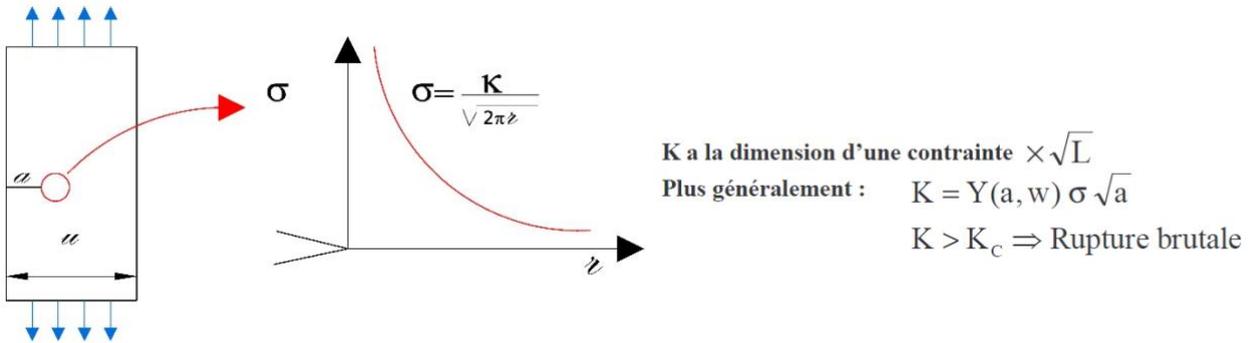


Figure 11.08 : Principe du coefficient d'intensité de contrainte

Le coefficient K_I caractérise la discontinuité du champ de déformation créé par un défaut dans une pièce donnée sous un état de contrainte donné. Quand $K_I > K_c$ (valeur critique ou ténacité), on a une propagation brutale du défaut.

Le terme $Y(a,w)$ peut se calculer analytiquement dans les cas les plus simples. Différents auteurs ont aussi donné des méthodes de calculs et tabulé des résultats afin de faciliter sa détermination. Il existe aussi des méthodes de détermination du $Y(a,w)$ par calculs aux éléments finis.

Le facteur d'intensité de contrainte K_I d'une fissure concentrique avec la barre (aximétrie) est de la forme :

$$K_{IC} = \sigma_{net} \sqrt{\pi D} f \left| \frac{d}{D} \right|$$

dans laquelle :

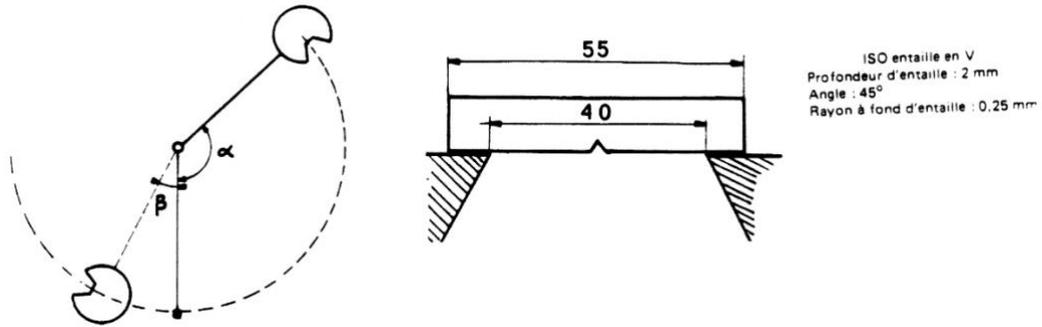
- D est le diamètre de la barre ;
- d est le diamètre du ligament restant derrière la fissure ;
- σ_{net} est la contrainte de traction calculée en tenant compte de la réduction de section.

La fonction $f \left| \frac{d}{D} \right|$ a été calculée par divers auteurs. Les résultats obtenus sont cohérents à 20 % près en général.

Le facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} est une valeur caractéristique du matériau à une température donnée. Il est normalement obtenu par un essai de mécanique de la rupture consistant à rompre en traction une éprouvette pré-fissurée par fatigue. Pour certains matériaux comme les aciers laminés, différents auteurs ont donné des correspondances avec des grandeurs plus faciles à obtenir comme par exemple la résilience, déterminée par l'essai de choc sur éprouvette entaillée décrit dans la norme NF EN 10045.

Résilience et relation résilience-ténacité (intensité de contrainte critique)

Du fait des difficultés de réalisation des essais de traction à basse température, les essais de rupture fragile sont généralement des essais de choc sur éprouvettes entaillées. Le plus utilisé est l'essai de flexion par choc sur éprouvette entaillée en V appelé essai de résilience. Dans ce dernier, l'éprouvette est rompue par choc sous l'effet d'une masse pendulaire (figures 3 et 4).



Figures 11.09 et 11.10 : Mouton pendule et dimensions standard d'une éprouvette d'essai

On appelle résilience l'énergie de rupture ramenée ou non à la section sous entaille de l'éprouvette. Celle-ci s'exprime en joules (symbole KV), anciennement en joules/cm² (symbole KCV).

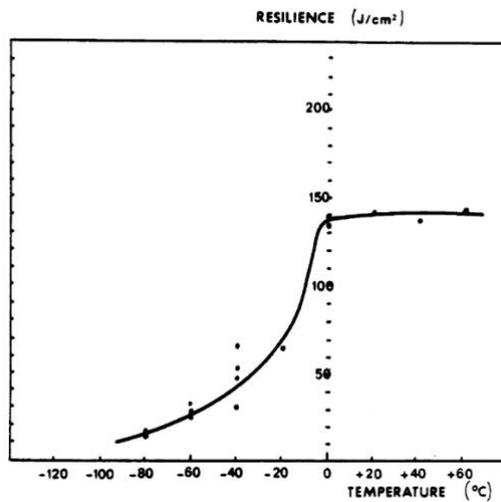


Figure 11.11 : Courbe de transition ductile-fragile à partir d'essais de résilience

Pour les températures supérieures à 0 °C, la rupture est ductile alors qu'elle est fragile pour les températures inférieures à -60 °C.

Comme sur la courbe précédente, la zone de transition entre le comportement ductile et le comportement fragile présente rarement une pente très prononcée. Il a donc été déterminé conventionnellement des températures de transition.

Dans ce cas, sur une certaine plage de températures, on trouve une coexistence entre les deux modes de rupture. On parle alors de courbe de transition bi-modale.

On complète parfois la courbe de transition de la résilience par une courbe de transition de la cristallinité :

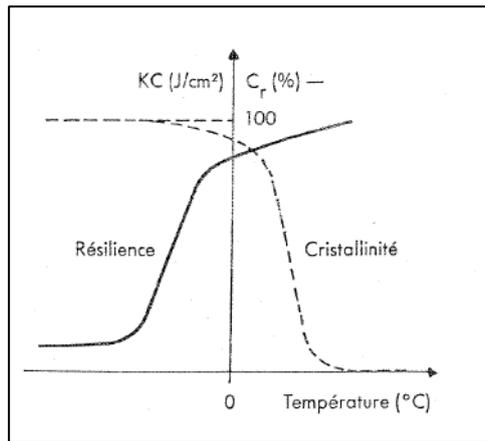


Figure 11.12 : Courbes de résilience et de cristallinité

La cristallinité est égale à 100 fois le rapport entre la surface de rupture à grains (faciès fragile) et la surface de rupture totale.

Pour les aciers laminés, certains auteurs ont donné des relations entre ténacité et résilience. Les relations entre K_{IC} et KV ont été les suivantes où KV est en joules, K_{IC}/E en N/mm et K_{IC} en $MPa\sqrt{m}$:

- à basse température (plateau fragile de la courbe de résilience) la relation de Barsom-Rolfe donne : $\frac{K_{IC}}{E} = 0.225(KV)^{\frac{2}{3}}$ soit $K_{IC} = 6.76(KV)^{\frac{3}{4}}$,
- dans le domaine de température correspondant à la transition ductile-fragile de la résilience, la relation de Sailors-Corten donne : $K_{IC} = 14.6(KV)^{\frac{1}{2}}$,
- pour toutes les températures, la méthode de Marandet-Sanz peut s'appliquer. Elle consiste à admettre que les courbes $K_{IC}(T)$ et $19(KV)^{\frac{1}{2}} = y(T)$ sont parallèles et se déduisent l'une de l'autre par une translation. Dans cette étude, la translation est définie par le seul résultat expérimental donnant la ténacité K_{IC} à 20 °C.

Critère de rupture brutale

Le critère de rupture brutale est défini par $K_I > K_{Ic}$ par augmentation de la contrainte, diminution de la température ou augmentation de la taille du défaut par fatigue, ces phénomènes pouvant tous se traduire par une évolution de la microstructure.

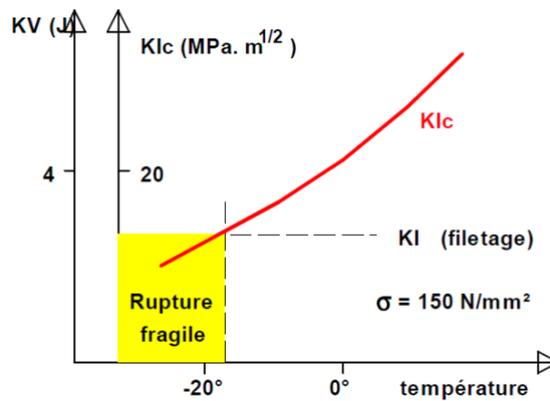


Figure 11.13 : Critère de rupture brutale

Quelques repères

Les valeurs de résilience des aciers à basse température sont un bon indicateur du niveau de risque de rupture fragile.

La qualité des aciers utilisés sur les ponts modernes est la qualité K2, soit une résilience de 40 joules à -20 degrés.

L'IRSID-OTUA donne des repères obtenus à partir d'essais de résilience réalisés après des avaries observées sur des structures en acier à basse température. Les énergies moyennes de rupture observées à la température de l'avarie le long de la fissure sont données par les résiliences en joules :

- tôle où la cassure a pris naissance : 8 – 9 ;
- tôle traversée par la cassure : 12.5 ;
- tôle où se sont terminées les cassures : 21.

Ces valeurs donnent des ordres de grandeur des niveaux de résilience qui permettent l'initiation, la propagation et l'arrêt d'une fissure.

Critères mis au point en 1987 pour permettre la prise de mesures adaptées par temps froid

Le comportement des aciers mécaniques utilisés sans traitement thermique contrôlé dans les barres filetées (absence de striction et présence de clivages sur les surfaces de rupture) a conduit à utiliser la mécanique linéaire élastique de la rupture. Les relations entre ténacité et résilience ont été examinées en croisant deux méthodes, celle de Maradet-Sanz et celle de Barsom-Rolfe. Le KI a été calculé en prenant l'effet d'entaille du filetage sur une barre sollicitée en traction pure à 150 MPa.

Les conditions modernes de KV = 27/28 joules ne pouvant être appliquées, l'étude des aciers en barres menée à la suite de l'effondrement du pont de Sully-sur-Loire a conduit à caractériser six classes d'acier sur la base de leur résilience à +20 et -20 degrés.

signification des classes :				
documents de référence		résilience		
JP Persy	JP Goumelon	KV -20°C	KV +20°C	
A	III	$\leq 5 \text{ j}$	$\leq 10 \text{ J}$	risque de rupture fragile important à basse température
B	IIa	"	$> 10 \text{ J}; \leq 20 \text{ J}$	risque de rupture fragile modéré sauf par température extrême
C	IIb	"	$> 20 \text{ J}$	risque de rupture fragile modéré sauf par température extrême
D	Ia	$> 5; \leq 10 \text{ J}$	$\leq 20 \text{ J}$	risque faible
E	Ib	"	$> 20 \text{ J}$	risque faible
F	Ic	$> 10 \text{ J}$	$> 20 \text{ J}$	risque faible

Figure 11.14 : Signification des six classes d'acier en fonction de leurs résiliences à +20 et -20 degrés

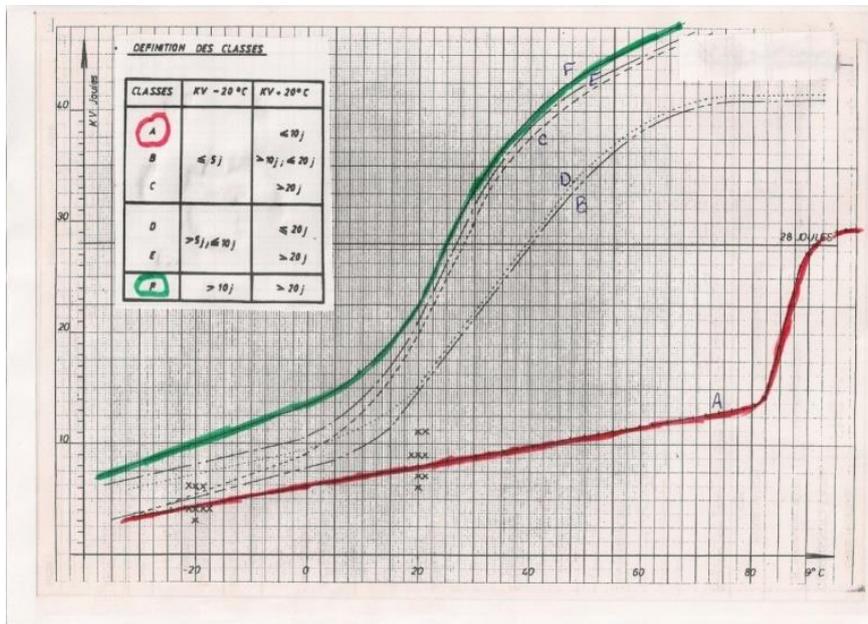


Figure 11.15 : Définition des classes d'acier en fonction de leurs résiliences à +20 et -20 degrés

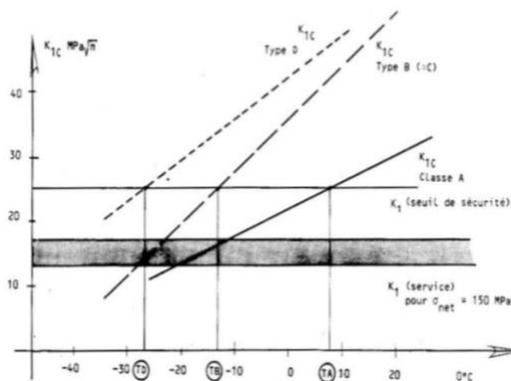


Figure 11.16 : Classes de fragilité définies par la méthode RST de 1985

Ce classement était accompagné d'une analyse chimique, d'une métallographie et d'une étude géométrique des filetages déterminant un coefficient de concentration de contrainte caractérisant leur agressivité. Ces éléments, complétés par l'analyse des conséquences de la rupture des pièces fragiles, permirent de donner des directives de gestion des ponts suspendus par temps froid.

L'interprétation des examens était basée sur les éléments suivants :

- classe de résilience A : risque de rupture fragile important à basse température - changement des pièces concernées - mesure d'exploitation immédiate : fermeture de l'ouvrage quand la température descend sous les 5 ou 0 degrés en fonction de l'état général ;
- classes de résilience B et C : risque de rupture fragile modéré sauf à température extrême – analyser les facteurs aggravants (géométrie, Kic, Kt) - Inspection détaillée de l'ouvrage pour détecter les anomalies de fonctionnement - Fermeture de l'ouvrage quand la température descend sous les -15 degrés ;
- classes de résilience D, E et F : risque de rupture fragile faible - Inspection détaillée de l'ouvrage.

Commentaires

Les aciers utilisés jusqu'à l'accident de Sully-sur-Loire étaient des aciers de nuances dédiées à la construction mécanique dont les caractéristiques ne sont garanties qu'après traitement thermique alors qu'ils sont utilisés bruts de laminage. Leur ténacité était souvent médiocre. De plus, les filetages étaient réalisés avec enlèvement de matière, ce qui coupe les fibres de laminage et crée des stries d'usinage, dispositions qui augmentent les concentrations de contrainte ainsi que la sensibilité à la rupture fragile et à la fissuration de fatigue.

On emploie de nos jours des aciers de construction métallique de nuance S355, la qualité de base étant K2, soit une énergie de rupture par choc de 40 joules à -20 degrés. En outre, les filetages sont désormais roulés c'est-à-dire réalisés sans enlèvement de matière en repoussant le métal par moletage, ce qui élimine l'effet d'entaille. Ces prescriptions modernes donnent une sécurité vis-à-vis de ces phénomènes de rupture bien supérieure à ce qui a été admis lors des analyses effectuées sur le parc d'ouvrages existants après l'accident 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 est-elle valide pour l'ouvrage ? N'est-elle pas augmentée par des flexions parasites ?
- les phénomènes de fatigue, non pris 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.

Annexe 12 - Changement de la 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.

Principes

Le changement de suspension consiste à mettre en place la nouvelle suspension, à lui transférer le poids de la partie suspendue et à 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.

Questions à se poser

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

- où et comment ancrer les différentes familles de câbles porteurs (câbles anciens, suspension provisoire éventuelle et câbles futurs) ?
- où et comment appuyer ces différentes familles de câbles (câbles anciens, suspension provisoire éventuelle et câbles futurs) ?
- 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) ?
- comment effectuer les transferts de charges en conservant des déformées et sollicitations admissibles par tous les éléments de la structure, en particulier les pylônes et les poutres de rigidité ?
- l'utilisation de palées est-elle possible ?

Utilisation de palées

L'utilisation de palées, quand elle est possible, simplifie significativement les opérations de transfert de charges.

Les transferts du poids du tablier sur les palées, puis des palées sur la nouvelle suspension s'effectuent avec l'une des méthodes suivantes ou une combinaison de celles-ci :

- vérinage et dévérinage aux ancrages des câbles porteurs, ainsi qu'au niveau des chariots d'appui dans le cas de câbles discontinus ;
- vérinages sur les palées ;
- allongement et raccourcissement des suspentes.

La technologie de ces opérations ainsi que leur compatibilité avec les amplitudes de déplacements nécessaires doivent être examinées avec soin.



Figure 1.201 : Tablier du pont du Teil posé sur palées pendant le changement de sa suspension

La réalisation des palées est effectuée le plus souvent par battage de tubes, éventuellement prolongé par un forage. Les méthodes d'exécution imposent fréquemment, pour des raisons d'encombrement d'engins de battage, une implantation hors de l'emprise du tablier et donc la réalisation finale d'un chevêtre transversal. L'espacement des palées est déterminé par les possibilités d'implantation mais aussi par les performances en flexion et à l'effort tranchant du tablier. Les poutres de rigidité des ponts suspendus sont naturellement peu sollicitées à l'effort tranchant. Le choix du nombre de palées résulte alors d'une optimisation entre le nombre d'appuis provisoires et l'importance des renforcements nécessaires du tablier, aspect plus important dans le cas de poutres treillis que dans le cas de poutres à âme pleine.

Changement de suspension sans palées

Possibilités d'ancrage des différentes familles de câbles

La première difficulté à résoudre consiste à ancrer les différentes familles de câbles porteurs qui vont être utilisées : câbles anciens, câbles neufs et éventuellement suspension provisoire.

Le problème de la réutilisation des barres d'ancrage peut s'avérer délicat car les parties filetées sont potentiellement sensibles à la fatigue et/ou au risque de rupture fragile par temps froid.

Dans le cas où la réutilisation des barres d'ancrage est jugée acceptable, le problème à résoudre est un problème de géométrie spatiale. On peut utiliser une des méthodes suivantes.

1. Utilisation de surlongueurs sur des axes d'ancrage transversaux (cas d'accrochage des culots avec des étriers).
2. Utilisation de surlongueurs manchonnées sur les barres d'ancrages longitudinales.
3. Utilisation de chevêtres transversaux en appui sur les culots des anciens câbles.

La géométrie du dispositif doit conserver la répartition de l'effort de traction entre les barres et ne pas introduire de flexion. La réutilisation des anciennes barres a donc des conséquences importantes sur la structure des nouveaux câbles.

Dans le cadre de la rénovation du pont de Tancarville, 60 torons de 70 mm ancrés sur trois barres chacun ont ainsi été remplacés par 2 x 90 torons de 40 mm ancrés sur une barre chacun. Des cadres de déviation ont également été placés dans la zone d'épanouissement pour éviter les conflits entre les deux familles, en particulier lors de déplacements dus aux transferts de charges mais aussi pour ne pas introduire de traction dans les barres.

La décision de ne pas réutiliser les anciennes barres d'ancrage a des conséquences lourdes et peut conduire à des aménagements importants dont voici quelques exemples :

- construction de nouveaux massifs d'ancrage ;
- construction d'une poutre d'ancrage en appui sur les anciens massifs ;
- construction de nouveaux massifs d'ancrage appuyés sur les anciens ;
- forages de grande longueur nécessaires à la fixation de nouvelles barres dans les massifs existants.



Figure 12.02 : Le pont de Carennac pendant le changement de sa suspension

Mouvements de selles, de pylônes, de câbles et de tablier

Quand les câbles sont seuls, la charge sur les selles est modérée et le câble risque de glisser. La selle est donc le plus souvent positionnée initialement afin d'égaliser les tractions de part et d'autre de celle-ci alors que, en fin d'opération, on recherche l'équilibre des composantes horizontales afin de maintenir les pylônes en compression simple dans l'ouvrage à vide et à la température de réglage.

Les selles sont donc placées initialement avec un décalage vers l'extérieur de la travée suspendue principale. Puis, au fur et à mesure du chargement des câbles et de l'augmentation du frottement mobilisable sur les selles, on les rapproche de leur position de réglage final.

Dans les ouvrages modestes, on peut remplacer tout ou partie des mouvements de selles par des déplacements des culots d'ancrage.

L'ajout de mordaches en butée sur les selles permet d'augmenter la possibilité de déséquilibre des efforts de traction de part et d'autre de celles-ci. Cette disposition peut donc permettre de limiter le nombre de phases nécessaires au transfert de charges (actions sur les ancrages, sur les suspentes ou mouvements de selles).

Dans la travée suspendue, le câble qui se charge descend alors que l'ancien câble détendu se raccourcit et monte. Ces mouvements antagonistes des deux suspensions doivent se dérouler sans conflit géométrique. Il peut s'agir du transfert de l'ancienne suspension vers la nouvelle, de l'ancienne vers une suspension provisoire ou d'une suspension provisoire vers la nouvelle.

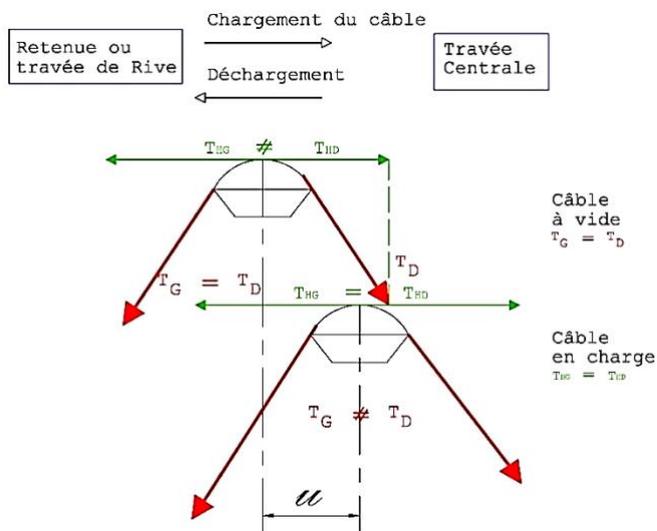
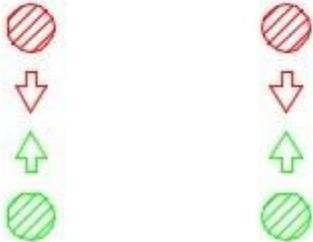


Figure 12.03 : Évolution de l'équilibre des efforts de traction et de poussée au cours d'un changement de suspension



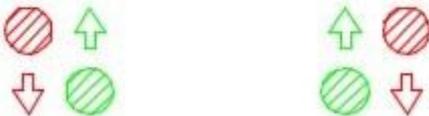
Ancienne suspension



Si on place la nouvelle suspension au-dessus de l'ancienne, il convient de garder une distance verticale suffisante afin d'éviter le contact lors du transfert. Cette solution a été couramment utilisée lors du remplacement des câbles des ponts à une travée suspendue de la première génération (voir le problème des suspentes.)



Si le câble ancien peut être remplacé par deux câbles latéraux, les conflits géométriques sont évités si la conception des suspentes et de leurs attaches prend correctement le problème en compte. C'est cette option qui a été utilisée lors du remplacement de la suspension du pont de Tancarville.

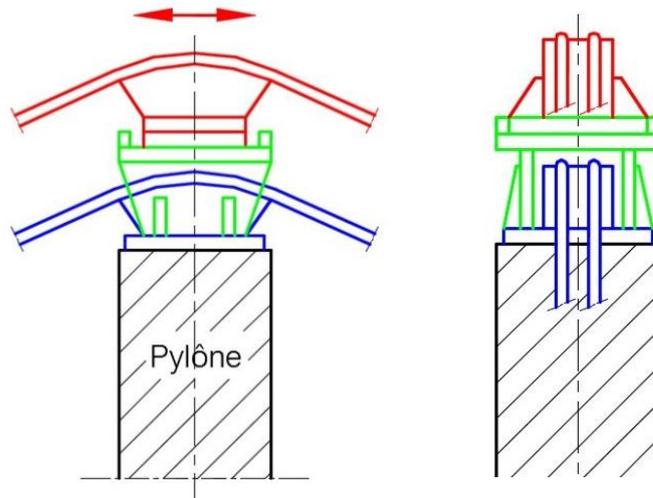


La nouvelle suspension peut être placée à l'extérieur de l'ancienne. Cette solution évite les conflits géométriques mais exige des adaptations lourdes de la structure : déplacement de l'action des câbles sur les pylônes et déplacement de la position en plan des ancrages des câbles et des attaches basses des suspentes. Ce principe a été utilisé lors du remplacement de la suspension du pont d'Aquitaine.

Les déplacements des selles d'appui, du niveau des câbles et les variations de longueurs des suspentes nécessaires aux transferts de charges imposent des chargements de déformation des pylônes et du tablier. Le maintien de ces éléments structurels dans un état admissible détermine le phasage des opérations de transfert.

Appuis des câbles

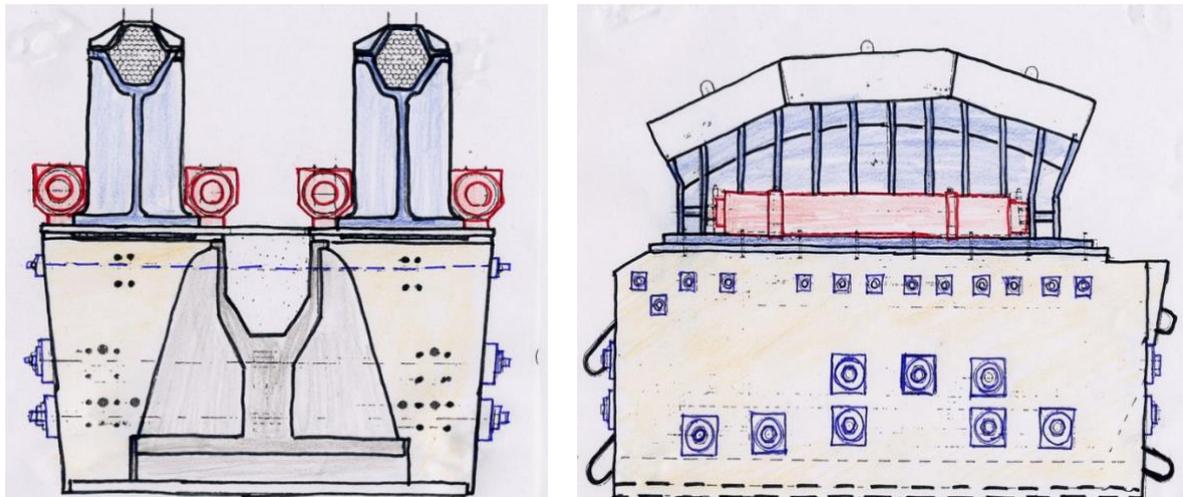
Il faut pouvoir appuyer les différentes familles de câbles porteurs. Sur les ouvrages modestes à une travée suspendue, on superpose souvent les selles, et donc les suspensions, et l'ancienne selle est noyée dans un dé en béton à la fin de l'opération.



Figures 12.04 et 12.05 : Superposition de selles d'appui anciennes et nouvelles lors d'un changement de suspension

Les mouvements de selles doivent être contrôlés : petits déplacements et butées pour les ouvrages modestes, mouvements contrôlés avec des vérins horizontaux et déplacements intégrés dans le phasage général du transfert de charges pour les plus grands ouvrages.

Transfert de charges sur des câbles latéraux



Figures 12.06 et 12.07 : Renforcements et adaptations de selles d'appui lors du changement de la suspension du pont de Tancarville

Le changement de la suspension du pont de Tancarville est un bon exemple de transfert de charges sur des nouveaux câbles latéraux. Sur ce pont, le principe suivant a été retenu :

- chaque câble porteur, composé de 60 torons de 72 mm, est remplacé par deux câbles plus petits composés chacun de 90 torons de 40 mm et disposés de part et d'autre du câble ;
- l'ancienne selle est noyée dans un massif de béton précontraint transversalement ;
- les nouvelles suspentes sont doubles.

Utilisation d'une suspension provisoire

Quand il est possible, le remplacement sans suspension provisoire constitue la solution la plus économique car on économise le coût d'une suspension provisoire et mais aussi d'un transfert de charges. Les principales causes d'impossibilité de cette solution sont les suivantes :

- on ne trouve pas de solution pour les ancrages, les appuis des câbles ou les aspects technologiques du transfert de charges ;
- toute modification de l'aspect de l'ouvrage est impossible car l'ouvrage est classé.

Cinématique d'un changement de suspension

Le changement de suspension consiste à effectuer les opérations suivantes :

- réaliser les appuis des différentes familles de câbles ;
- ancrer les différentes familles de câbles ;
- mettre en place les différentes familles de câbles et effectuer les réglages géométriques ;
- transférer la charge du tablier d'une famille de câbles à l'autre en limitant les déformations et sollicitations dans la structure à des valeurs acceptables. Ce transfert de charges s'effectue le plus souvent en jouant sur la longueur et donc la charge des deux familles de suspentes, mais dans le cas des ponts suspendus modestes à câbles discontinus, on peut aussi faire varier les longueurs des câbles porteurs au niveau des chariots d'appui,
- effectuer un réglage final.

Exemple de cinématique d'un changement de suspension sur une travée suspendue

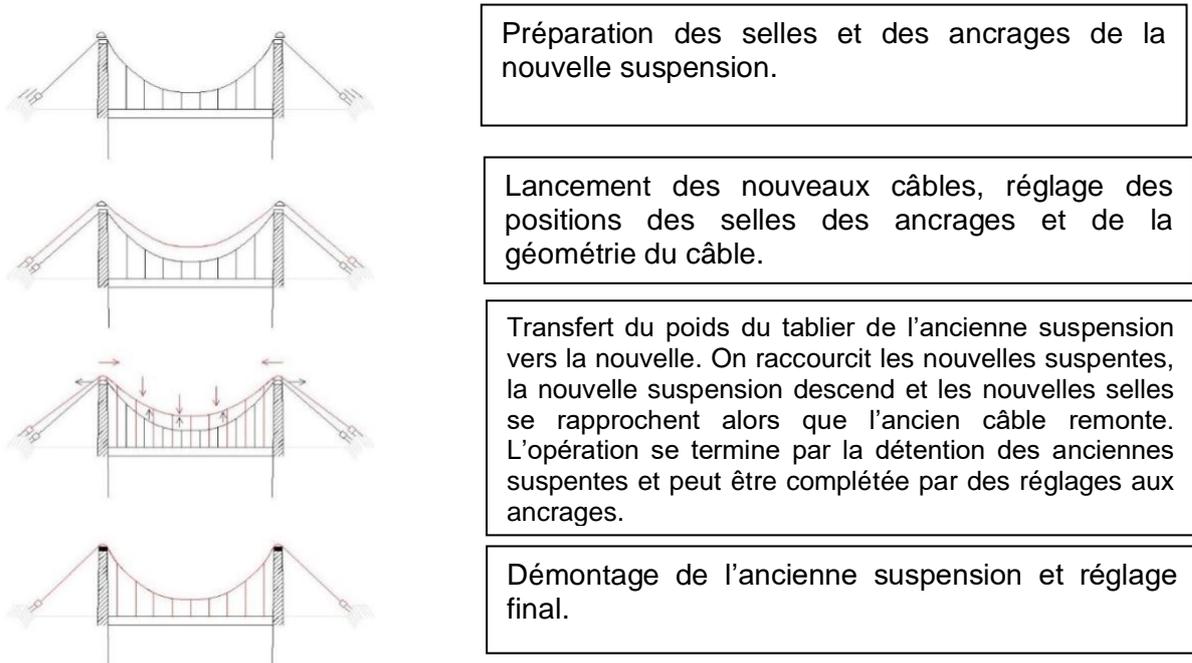


Figure 12.08 : Cinématique de changement d'une suspension

Systèmes de transfert de charges

Les déplacements et 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 que l'on a contrôlé que tout l'effort transite par les vérins, on peut mesurer l'effort de traction, le modifier, allonger ou raccourcir l'élément.



Figure 12.09 : Exemple de système de transfert de charges

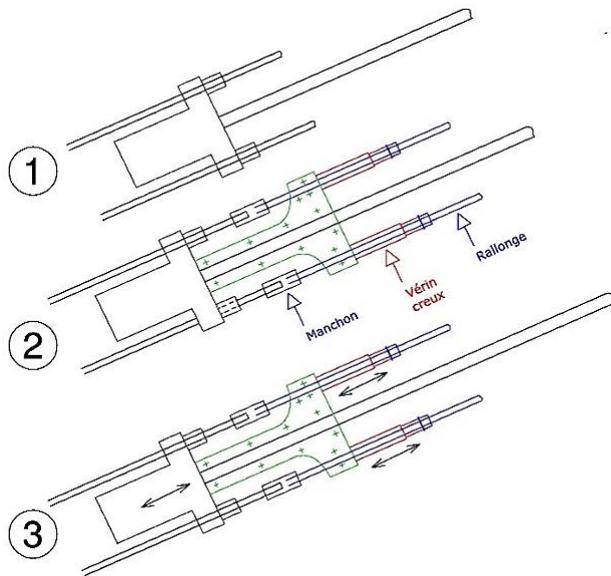


Figure 12.10 : Principe d'un système de transfert de charges



Figure 12.11 : Exemple de dispositif de transfert de charges

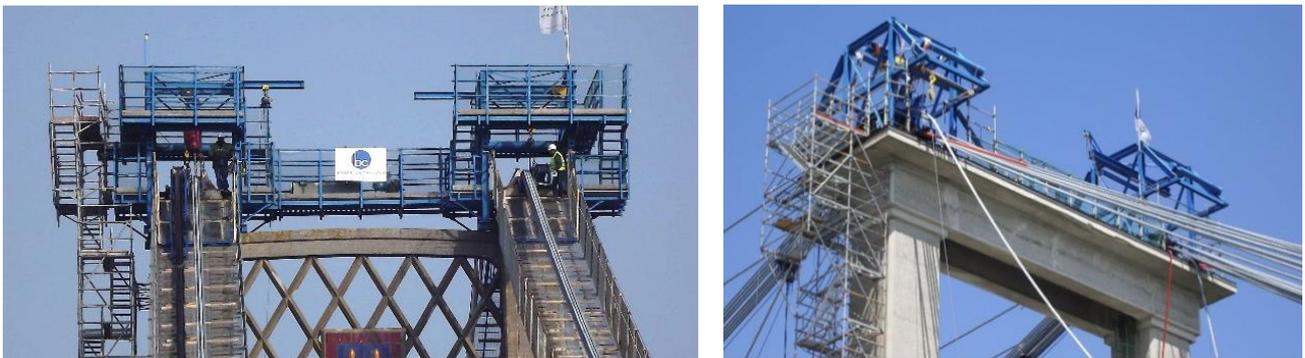
Attaches provisoires d'un câble

Des efforts peuvent être provisoirement transférés aux câbles à l'aide de mordaches, des pièces métalliques serrées sur le câble avec des boulons HR et transmettant les efforts par frottement.



Figures 12.12 et 12.13 : Exemples de mordaches

Le lancement des nouveaux câbles et les adaptations des selles exigent le plus souvent l'installation de portiques provisoires en tête de pylône.



Figures 12.14 et 12.15 : Exemples de portiques provisoires en tête de pylône

Utilisation de passerelles à câbles ou catway

De grands ouvrages ont été construits sans passerelles provisoires suivant les câbles, mais dans les grands ponts construits récemment, des passerelles à câbles ont été utilisées afin de permettre au personnel de l'entreprise de suivre les mouvements des différentes familles de câbles. Il faut noter que la longueur des passerelles doit être réglable pour suivre les variations de niveau des câbles lors des transferts de charges.



Figures 12.16 et 12.17 : Exemple de passerelle provisoire de travail

Lancement des câbles

Le lancement des câbles est effectué à l'aide de systèmes téléfériques. L'opération peut être facilitée avec une goulotte en PEHD fixée dans une passerelle à câbles. Un réglage fin est effectué sur le premier câble élémentaire, les câbles suivants étant réglés sur le premier.

Exemple du changement de suspension du pont d'Aquitaine

Le pont d'Aquitaine possède trois travées suspendues. Les portées des câbles sont de 150 m, 393 m et 150 m. Le tablier a une largeur utile de 20 m.

L'ancienne suspension a été remplacée par une nouvelle suspension située 2 x 2 m à l'extérieur de l'ancienne. Cette position en plan différente a imposé des aménagements très lourds de la structure :

- réalisation de poutres d'ancrage des câbles porteurs en appui horizontal sur les massifs ;
- confortement par précontrainte des têtes de pylônes ;
- aménagement de la charpente du tablier en lien avec le nouvel écartement des attaches basses des suspentes.

La cinématique générale peut être schématisée de la manière suivante :

1. Réalisation des nouveaux ancrages, placement des nouvelles selles et sellettes ; les selles sur pylônes sont placées à 0,594 m à l'extérieur de leur position finale.
2. Lancement des nouveaux câbles : le nouveau câble est situé 3,80 m au-dessus de l'ancien au milieu de la grande travée.
3. Fixation des suspentes en travées latérales ; elles sont alors détendues.
4. Mise en tension d'une suspente sur deux en travée centrale (avec des pas de déplacement des selles de 2 cm vers le centre).
5. Réglage à la longueur de calcul des suspentes en travée latérales.
6. Mise à la longueur théorique d'une suspente sur deux en travée centrale. Les déplacements de selles sont portés à 5 cm ce qui est permis par une charge plus importante des câbles porteurs. Le tablier est 1,35 m au-dessus de sa position définitive et le nouveau câble est 0,36 m sous l'ancien.
7. Mise à la tension des suspentes restantes puis réglage de leur longueur. Le tablier est alors 1,40 m au-dessus de sa position de réglage et il porte aux 2/3 sur la nouvelle suspension.
8. Déchargement de l'ancienne suspension par détention des suspentes avec un pianotage étudié pour équilibrer les efforts horizontaux sur les selles mais aussi la tension dans les anciennes suspentes.
9. Démontage de l'ancienne suspension.

On trouvera ci-dessous plusieurs photos de ces opérations.



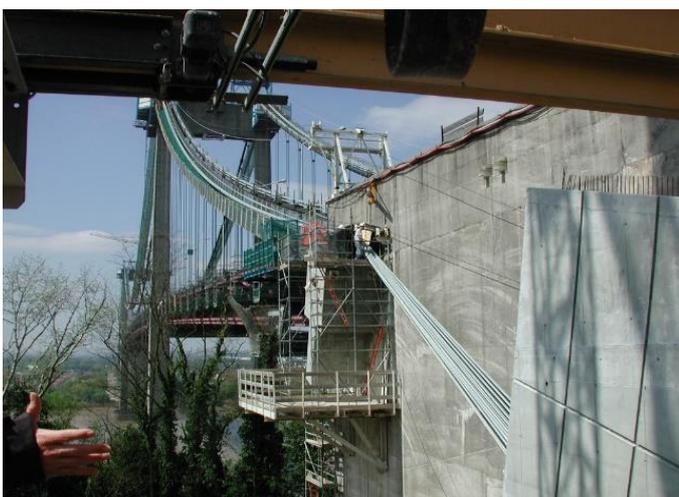
Figure 12.18 : Poutre de hissage de la poutre d'ancrage rive gauche



Figure 12.19 : Poutre d'ancrage rive gauche en cours de hissage



Figure 12.20 : Transfert de charges en pied de suspente



Figures 12.21 à 12.24 : Lançage des nouveaux câbles du pont d'Aquitaine

Annexe 13 - Nacelles de visite

Sur un pont suspendu, la présence des suspentes rend difficile, voire impossible, l'utilisation de passerelles négatives à partir du dessus du tablier. Ces ouvrages sont donc souvent équipés de passerelles ou de nacelles mobiles pouvant se déplacer sur des rails fixés sous le tablier.



Figure 13.01 : Exemple de nacelle de visite accrochée sous le tablier

Sur le patrimoine existant, l'état des nacelles de visite est plus ou moins satisfaisant. Elles peuvent dater des années 1930 et avoir été construites à l'occasion de la grande rénovation des ponts suspendus après le rachat des concessions du début du 20^e siècle et lors de la modernisation et du renforcement des ponts initiés par le ministère des travaux publics avec sa circulaire sur les charges du 10 mai 1927.

Elles ont été conçues à une époque où les exigences de sécurité ne correspondaient pas aux standards modernes.

Leur entretien peut avoir été délaissé, avec simplement une remise en peinture lors de travaux sur l'ouvrage principal et quelques réparations de planchers percés.

Leur usage étant peu fréquent, les galets sont souvent grippés et les systèmes de traction bloqués, ce qui peut les rendre inaptés à leur fonction. Enfin, leur utilisation pour des travaux de remise en peinture lors de précédents travaux aboutit très fréquemment à des grippages des roulements ou des galets, envahis par les produits de décapage.

Pourtant, il est essentiel de vérifier leur fiabilité et d'en assurer la pérennité, quitte à envisager une mise à niveau périodique, surtout en ce qui concerne la sécurité des points suivants :

- les conditions d'accès ;
- les conditions d'utilisation (charges, etc.) ;
- l'état de la structure et sa sécurité lors des déplacements.

La présente annexe ne traite pas de l'aspect juridique du problème, un domaine en perpétuelle évolution sur lequel il est conseillé aux gestionnaires de se rapprocher d'un organisme habilité.

Analyse de risques liée aux passerelles

Pour les nacelles non motorisées de ponts suspendus, la réglementation du travail s'en tient aux principes généraux. Il appartient donc au maître d'ouvrage de procéder à une analyse des risques et de mettre en place les moyens de préventions adaptés. Cette analyse peut s'effectuer à partir des pratiques connues en listant les principaux risques identifiés.

Risques mécaniques

Disposer d'un dossier descriptif de la nacelle est indispensable.

À cet effet, il est important de retrouver les archives encore existantes dans les différents services techniques publics (CD, ex DDE, préfecture, collectivités) et de retrouver les conditions pour lesquelles elles ont été conçues : charges, nuances d'acier, etc. Certains constructeurs disposent également d'archives.

En cas d'absence de données, un relevé des profilés, des assemblages et des différents composants sera nécessaire pour assurer ce calcul ou ce re-calcul. Il permettra de vérifier les charges maximales admissibles sur la nacelle et d'encadrer son usage par un affichage ultérieur. Ce calcul n'omettra pas de vérifier aussi les fixations de la passerelle sur l'ouvrage : rails de roulement, axes des galets, etc.

Risques d'accidents au niveau de l'accès à la nacelle

Les conditions d'accès à la nacelle peuvent être à l'origine de risques importants pour les inspecteurs.

L'accès au-dessus de la poutre de rive nécessite un transit sur la semelle supérieure avant d'accéder à la nacelle proprement dite. Une réflexion sur des dispositifs adaptés facilement amovibles et déplaçables doit être menée.

L'accès à l'échelle de descente doit laisser les opérateurs en sécurité quelle que soit la phase de transfert. Le risque de chute entre le passage de la semelle et l'échelle d'accès est à étudier (paliers, crinolines, etc.).

L'état et la conception des échelles et des paliers doivent être conformes aux règles en vigueur.



Figure 13.02 : Exemple d'accès à la nacelle dangereux

Risques de chute du personnel et du matériel

Le travail dans la nacelle s'apparente à du travail en hauteur dans la mesure où celle-ci est souvent à plus de 3 m de hauteur du terrain naturel. Il faut donc vérifier la conformité de la nacelle aux exigences du Code du travail : échelles, garde-corps, lisses, protections latérales, plinthes, protections du plancher de façon à éviter tout risque de chute de personnes et d'objets en contrebas.



Figure 13.03 : Echelles d'accès avec risque de chute



Figure 13.04 : Panier équipé

Bien que cela ne soit pas courant, des points de fixation pour travail à la corde peuvent également être prévus et vérifiés, pour effectuer des tâches ne pouvant être sécurisées par des protections collectives. Attention, ceci nécessite l'application d'une autre réglementation.

Risque de déstabilisation de la nacelle

Dans la mesure où la structure est en bon état de conservation, une attention particulière sera portée à la conception et à la fixation des rails, des galets et des dispositifs anti débordement. Tous les systèmes ne se valent pas, en voici quelques exemples.

Galets avec gorges roulant sur la semelle supérieure d'un profilé en I



Figures 13.05 et 13.06 : Exemples de galets avec gorges roulant sur un profilé en I

Cette disposition est rassurante vis-à-vis du cheminement. La nacelle roule sur la semelle supérieure de deux profilés en I, disposés de part et d'autre du tablier, par l'intermédiaire de galets équipés de dispositifs latéraux obligeant les galets à rester centrés sur cette semelle. Avec cette disposition, il n'y a jamais d'encombrement du chemin de roulement et les axes, facilement entretenus par de simples graissages, sont rarement en panne.

Galets plats roulant dans un profilé en I disposé à plat



Figure 13.07 : Exemple de galet plat roulant dans un profilé en I disposé à plat

Cette disposition est rassurante vis-à-vis du cheminement car le galet, sécurisé par un dispositif complémentaire de guidage et par des butées longitudinales et transversales, ne peut pas sortir de l'UPN. Cependant, le creux de l'UPN est souvent encombré de salissures qu'il convient de nettoyer avant usage. Il est à noter qu'un galet à roulement, même de catégorie étanche, a également tendance à se gripper (humidité, sablages).

Galets plats sur IPN (solution déconseillée)

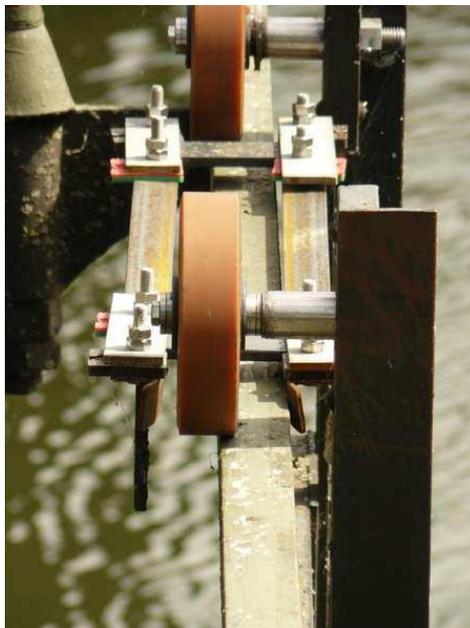


Figure 13.08 : Exemple de solution peu satisfaisante avec des galets plats roulant sur des IPN

Certaines passerelles équipées de galets plats roulent sur les semelles supérieures de profilés type IPN. Cette disposition n'est pas satisfaisante car le galet n'est absolument pas guidé. La photo ci-dessus montre un cas de figure de ce type où les dispositifs anti-cheminement heureusement prévus ont permis d'éviter au galet de quitter la semelle supérieure de l'IPN.

Efficacité des systèmes de traction manuels

Certaines passerelles se déplacent grâce à des mécanismes qui demandent trop d'efforts aux opérateurs pour franchir les portées importantes de ces ouvrages, phénomène pouvant être accentué par un profil en long plus penté près des rives.

Il arrive aussi que les mécanismes soient indépendants entre l'amont et l'aval et nécessitent une excellente coordination entre opérateurs, sous peine de bloquer la nacelle.

Pour contourner ces difficultés, il est parfois fait appel à des solutions bricolées qui peuvent être à l'origine d'accidents graves et qu'il faut strictement interdire. Il faut également noter qu'une éventuelle motorisation des nacelles, même momentanée (treuils électriques, moteurs électriques), nécessite de modifier le classement de l'équipement et d'en revoir fondamentalement la mise en conformité.

Les exemples qui suivent illustrent certains dispositifs de traction.

Traction par chaîne

La figure 13.09 ci-dessous illustre un système de déplacement par chaîne.



Figure 13.09 : Traction par chaîne



Figure 13.10 : Traction par boîtier réducteur central, cardan et chaînes

Traction par boîtier réducteur central, cardans et chaînes

La figure 13.10 ci-dessus illustre un système de déplacement par boîtier réducteur, cardans et chaînes. Ce système donne généralement satisfaction, limite le nombre d'opérateurs et assure une bonne mise en ligne de la nacelle. Son entretien est aisé. Il est recommandé d'enlever la manivelle en dehors des opérations de déplacement.

© 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 › Cerema

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

ISBN : 978-2-37180-509-5

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

ou par mail › 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 | Annexes

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 : 978-2-37180-509-5

