

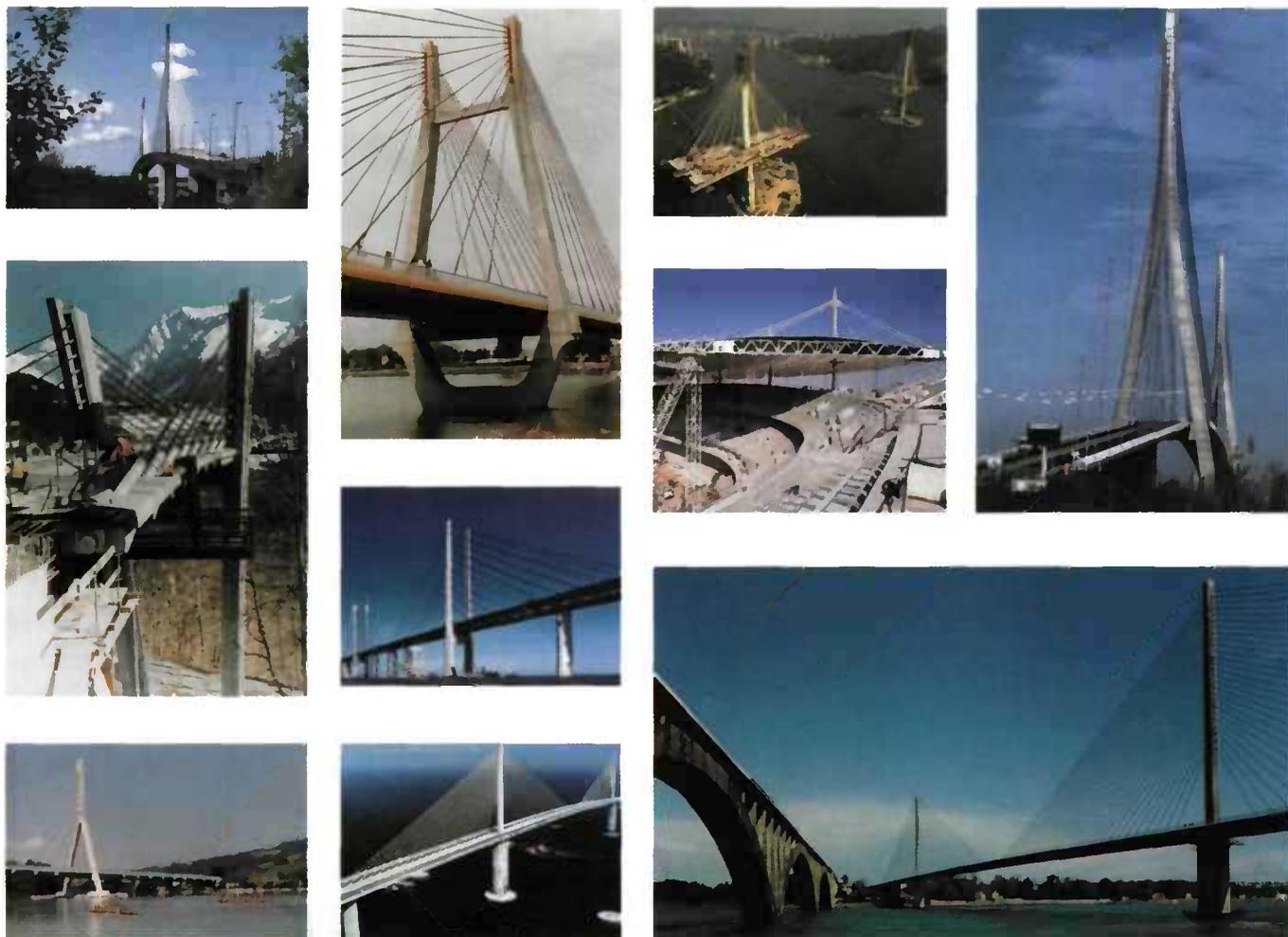
Haubans

Recommandations de la commission
interministérielle de la précontrainte

Photos couverture

①		⑦	
	④	⑧	⑨
②		⑩	
	⑤		
③	⑥		

- | | |
|---|----------------------|
| Photo 1 : Pont de Brotonne – France | (photo Freyssinet) |
| Photo 2 : Pont de Sunnuberg – Suisse | (photo Etic) |
| Photo 3 : Pont de Seyssel – France | (photo Setra) |
| Photo 4 : Pont de Bourgogne – France | (photo Setra) |
| Photo 5 : Pont d’Oresund – Danemark Suède | (photo Freyssinet) |
| Photo 6 : Pont de Sulshine Skyway – USA | (photo VSL) |
| Photo 7 : Pont de Ting Kau – Hong-Kong | (photo Fontainunion) |
| Photo 8 : Stade de France | (photo GTM) |
| Photo 9 : Pont de Normandie – France | (photo Freyssinet) |
| Photo 10 : Pont d’Iroise – France | (photo Freyssinet) |



Haubans

Recommandations de la commission
interministérielle de la précontrainte

novembre 2001

Setra

Document diffusé par le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes
Centre des Techniques des Ouvrages d'Art
46, avenue Aristide Briand – BP 100 – 92225 BAGNEUX CEDEX – France
Tél. 01 46 11 31 53 – Fax 01 46 11 33 55 – www.setra.equipement.gouv.fr

Page laissée blanche intentionnellement

SOMMAIRE

SOMMAIRE	3
1. PRÉAMBULE	7
MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL CIP SUR LES HAUBANS	8
CHAPITRE 2. GÉNÉRALITÉS	11
Article 2.1. Evolution de la technologie des haubans	11
Article 2.2. Fonctionnement et qualités exigées des haubans	14
CHAPITRE 3. DURABILITÉ DES HAUBANS	17
Article 3.1. Inventaire des facteurs de vieillissement des haubans	18
Article 3.2. Effets des sollicitations mécaniques et environnementales	20
Article 3.3. Choix des matériaux	22
Article 3.4. Besoin de remplaçabilité	24
CHAPITRE 4. VIBRATIONS DES HAUBANS	25
Article 4.1. Paramètres dynamiques d'un hauban	25
Article 4.2. Phénomènes physiques engendrant des vibrations	28
Article 4.3. Actions correctives	31
Article 4.4. Spécifications contre la vibration des haubans	36
CHAPITRE 5. COMPORTEMENT STATIQUE DES HAUBANS	39
Article 5.1. Introduction	39
Article 5.2. Modèle linéaire d'un hauban	39
Article 5.3. Effet approché du poids propre d'un hauban	42
Article 5.4. Modèle de la chaînette	47
Article 5.5. Modèle du câble pesant inextensible	51
Article 5.6. Modélisation d'un hauban réel	53
CHAPITRE 6. FLEXION DES HAUBANS	57
Article 6.1. Hauban dévié par une selle	57
Article 6.2. Prise en compte de la rigidité de flexion du câble à l'ancrage	58
Article 6.3. Vibrations d'un hauban en partie courante	63
Article 6.4. Flexion des câbles et durabilité	63
CHAPITRE 7. MÉCANIQUE DES HAUBANS EN CONSTRUCTION	67
Article 7.1. Préchargement des haubans	67

Article 7.2. Caractérisation intrinsèque du préchargement des haubans	71
Article 7.3. Calcul de la tension instantanée des haubans	77
Article 7.4. Mise en tension toron par toron	78
CHAPITRE 8. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES HAUBANS	81
Article 8.1. Modèle de la corde vibrante	81
Article 8.2. Modes de vibration d'un hauban pesant	83
Article 8.3. Excitation par le déplacement transversal d'un ancrage	91
Article 8.4. Excitation paramétrique par un déplacement longitudinal	93
CHAPITRE 9. PARTIE COURANTE	99
Article 9.1. Dispositions générales communes	99
Article 9.2. Catégorie MTP : haubans multi-torons parallèles	103
Article 9.3. Catégorie MFP : haubans multi-fils parallèles	108
Article 9.4. Catégorie TMC : haubans à torons multi-couches	111
Article 9.5. Barrière externe collective	115
Article 9.6. Autres types d'armatures	119
CHAPITRE 10. ANCRAGE DES HAUBANS	121
Article 10.1. Fonctions d'un ancrage de hauban	121
Article 10.2. Dispositions générales communes	122
Article 10.3. Classification des ancrages	125
Article 10.4. Ancrages C pour câbles de type MTP	126
Article 10.5. Ancrages M pour câbles de type MTP	130
Article 10.6. Ancrages B ou B+R pour câbles de type MFP	131
Article 10.7. Ancrages F+R pour câbles de type TMC	133
CHAPITRE 11. ESSAIS DE QUALIFICATION D'UN PROCÉDÉ DE HAUBANAGE	139
Article 11.1. Généralités	139
Article 11.2. Qualification mécanique des haubans	140
Article 11.3. Qualification de l'étanchéité des haubans	147
CHAPITRE 12. INSTALLATION DES HAUBANS	151
Article 12.1. Aspects organisationnels	151
Article 12.2. Fourniture	152
Article 12.3. Façonnage des haubans	153
Article 12.4. Mise en place des haubans	156
Article 12.5. Mise en tension et réglage	158
Article 12.6. Protection anticorrosion définitive	162
CHAPITRE 13. SURVEILLANCE ET MAINTENANCE DES HAUBANS	165
Article 13.1. Principes et objectifs de la maintenance des haubans	165
Article 13.2. Surveillance et maintenance	165
Article 13.3. Réglage des haubans	167
Article 13.4. Remplacement d'un hauban	168

CHAPITRE 14. RÈGLES DE CALCUL ET DE JUSTIFICATION DES HAUBANS	173
Article 14.1. Généralités	173
Article 14.2. Actions et combinaisons d'actions	173
Article 14.3. Résistance des haubans	177
Article 14.4. Etats limites ultimes	179
Article 14.5. Etats limites de service	181
Article 14.6. Vérifications à la fatigue	182
Article 14.7. Selles de déviation	184
Article 14.8. Câbles de précontrainte extradossée	185
CHAPITRE 15. RÉFÉRENCES	189
Article 15.1. Normes	189
Article 15.2. Références Bibliographiques	191
CHAPITRE 16. DÉFINITIONS ET NOTATIONS	193
Article 16.1. Glossaire	193
Article 16.2. Notations	197

Page laissée blanche intentionnellement

1. PRÉAMBULE

Au début de l'année 1997, la Commission Interministérielle de la Précontrainte (CIP) a décidé la constitution d'un groupe de travail chargé d'étudier les problèmes technologiques liés aux haubans, afin de mettre en place un système d'agrément semblable à celui qui s'applique aux procédés de précontrainte.

Ce groupe a rédigé le présent document, qui fait le point sur l'état de l'art et donne des recommandations sur la conception, la qualification et la mise en œuvre des systèmes de haubanage. Il a été rédigé en tirant parti des connaissances accumulées sur des ponts à haubans construits depuis trente ans en France ou à l'étranger. Cela comprend des ponts à haubans de grandes dimensions, tels que le pont de Brotonne, le pont de Normandie, le Second Pont sur la Severn, le pont Vasco de Gama, etc. mais aussi une grande variété d'ouvrages de dimensions plus modestes.

La technologie de haubanage décrite dans ce guide concerne principalement les ponts à haubans, dont les câbles se caractérisent par des surtensions importantes, des sollicitations en fatigue et une exposition directe à l'environnement. Plus généralement, on trouvera dans ce guide des recommandations utiles pour tous les câbles directement exposés aux agressions de l'environnement, et notamment les suspentes des ponts bowstring, les câbles de précontrainte extradossés ou sous-bandés, ainsi que les câbles utilisés dans toute structure haubanée de génie civil : couverture de stades, pylônes, etc.

En revanche, l'utilisation de réseaux de câbles reliés les uns aux autres est hors du champ de ce document, qui ne traite donc pas des structures spatiales à câbles ni de la technologie des ponts suspendus. En outre, les selles de déviation de haubans sont abordées seulement par quelques recommandations sur leur dimensionnement mais leur usage est déconseillé, du fait de leur incidence sur la durabilité des haubans et à cause de difficultés de maintenance et de remplacement.

Ce document se décompose en quatre parties :

- La première partie (chapitres 2 à 8) constitue un point sur les connaissances scientifiques. Elle se présente comme un manuel pouvant servir de référence aux concepteurs, et justifiant les choix recommandés dans les parties suivantes.
- La deuxième partie (chapitres 9 et 10) décrit les systèmes de haubanage communément utilisés actuellement, en formulant des recommandations sur la technologie permettant d'obtenir la meilleure durabilité.
- La troisième partie (chapitres 11 à 13) est le référentiel d'agrément et de mise en œuvre des procédés de haubanage, objet de la demande de la Commission Interministérielle de la Précontrainte.
- Enfin, la quatrième partie (chapitre 14) présente des règles de conception des haubans aux états limites.

Les paragraphes en écriture normale sont des recommandations

Les paragraphes en écriture italique sont des commentaires

Les paragraphes en écriture de corps inférieur sont des descriptions ou des exemples

MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL CIP SUR LES HAUBANS

Robert CHAUSSIN (Mission d'Inspection Spécialisée Ouvrages D'art) Président du Groupe

Yves BOURNAND (VSL)

Alain CHABERT (LCPC)

Louis DEMILECAMPS (GTM)

André DEMONTE (ISPAT - TREFILEUROPE)

Pierre JARTOUX (FREYSSINET INTERNATIONAL)

Patrick LABOURET (ISPAT - TREFILEUROPE)

Dominique LE GALL (BAUDIN CHATEAUNEUF)

Benoît LECINQ (SETRA¹)

Daniel LEFAUCHEUR (SETRA)

Claude NEANT (ETIC - BBR)

Ont également participé activement à la rédaction de ces Recommandations :

Michel MARCHETTI (FORMULE INFORMATIQUE)

Michel VIRLOGEUX (Ingénieur Conseil)

La coordination du document a été assurée par Jocelyne JACOB (SETRA) et Benoît LECINQ.

Les dessins ont été réalisés par Philippe JULLIEN et Louis RISTERUCCI (SETRA).

Crédit photos :

Photos couverture :

1, 5, 9 (Freyssinet) - 2 (Etic) - 3, 4, 10 (SETRA) - 6 (VSL) - 7 (Fontainunion) - 8 (GTM)

Photos 41, 49, 53 à 55 : Etic

Photos 6, 11, 34 : Fontainunion

Photos 8, 15, 16, 17, 19, 21 à 23, 25, 30, 32, 33, 42, 43, 46, 52, 56, 57, 59 à 61 : Freyssinet

Photos 29, 38, 39, 44, 47, 48 : GTM

Photos 12 à 14, 26 à 28 : LCPC

Photos 1 à 5, 7, 9, 10, 18, 20, 24, 35 à 37, 40, 45, 50, 51, 58 : SETRA

Photo 31 : VSL

¹ Au moment de la publication de ce document, Benoît LECINQ a rejoint le groupe FREYSSINET INTERNATIONAL

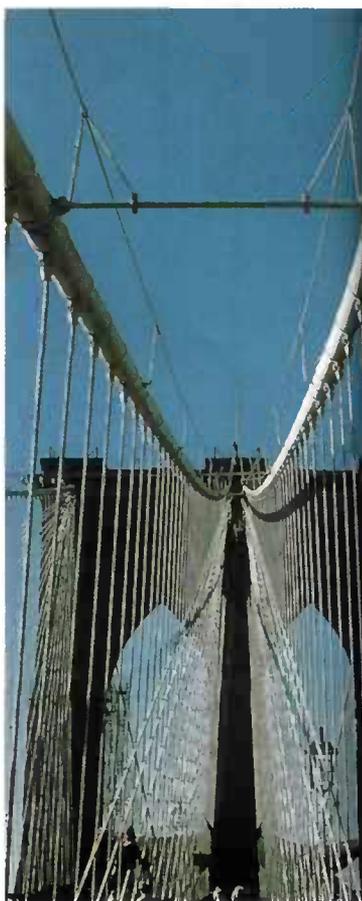
PREMIÈRE PARTIE :
POINT SUR LES CONNAISSANCES

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 2. GÉNÉRALITÉS

ARTICLE 2.1. ÉVOLUTION DE LA TECHNOLOGIE DES HAUBANS

L'origine du haubanage remonte au moyen âge, et les ponts haubanés ont connu un développement considérable au 18^e siècle. Malheureusement, à la suite d'accidents dus au développement insuffisant des moyens de calcul de la résistance des matériaux – notamment l'effondrement du pont de Dryburgh Abbey (Ecosse) en 1817 et l'écroulement du pont sur la Saale (Allemagne) en 1824 – l'ingénieur français Navier préconisa la technique des ponts suspendus et pendant plus d'un siècle, on ne construisit que très peu de ponts haubanés.



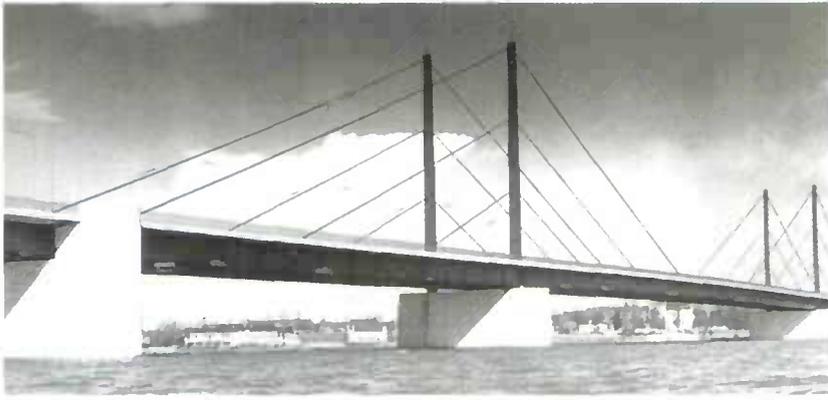
Durant cette période, quelques ouvrages haubanés virent néanmoins le jour : les ponts construits aux Etats-Unis par Roebling (pont de Wheeling sur l'Ohio en 1846, pont de chemin de fer sur le fleuve Niagara en 1855, pont mixte suspendu et haubané de Brooklyn à New-York en 1873) et les ponts transbordeurs à haubans construits par l'entrepreneur français Arnodin (Bilbao en 1893, Marseille en 1903 et Nantes en 1905).



▲ Photo 1 : le pont de Niagara

◀ Photo 2 : le pont de Brooklyn

L'essor des ponts haubanés modernes remonte seulement aux années 1950 : la nécessité de reconstruire de toute urgence et à moindre coût les ponts détruits durant la seconde guerre mondiale, ainsi que les progrès accomplis dans le domaine de la construction métallique, favorisèrent le retour des ponts à haubans. Les premiers ouvrages de cette nouvelle génération sont le pont de Donzère – Mondragon, construit en France, en 1952, par Caquot et le pont de Strömsund, construit en Suède en 1955. Il fut suivi d'une série de ponts haubanés métalliques construits durant les années 1950 et 1960 en Allemagne (Pont Theodor Heuss à Dusseldorf en 1958, pont de Séverin à Cologne, pont Duisburg-Neuenkamp, etc.) Ces ponts utilisaient généralement des haubans constitués de câbles clos [28].



▲ Photo 3 : le pont Theodor Heuss à Dusseldorf

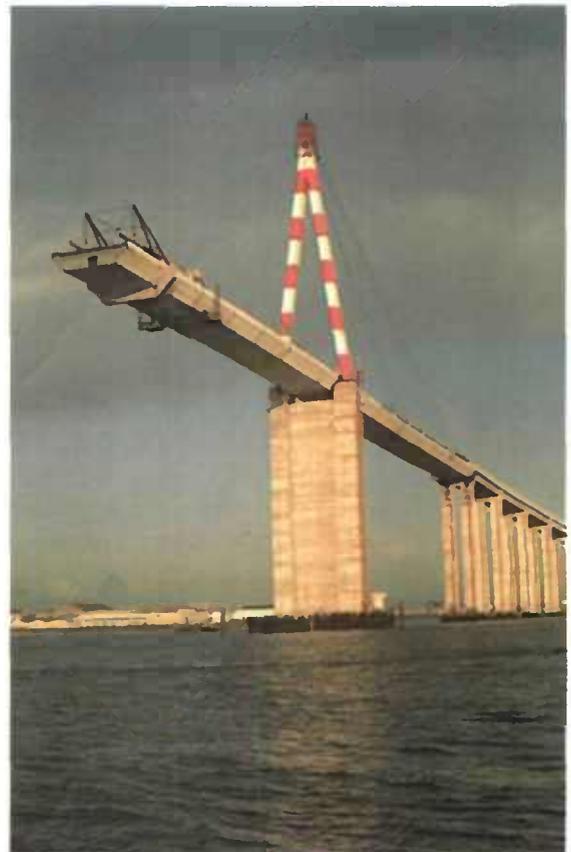


Photo 4 : le pont de Séverin à Cologne ►

De 1970 à 1985, la plupart des ponts haubanés utilisent des haubans à fils parallèles. On notera par exemple le pont Faro construit au Danemark avec le procédé BBR HIAM. On compte encore quelques ouvrages haubanés à câble clos (ponts Masséna, de Saint-Nazaire et de Seyssel en France) ou à barres parallèles : ponts de Penang (Malaisie) et de Dame Point (Etats-Unis) utilisant le procédé Dywidag. Les ponts de Brotonne en France (1977) et de Rande (1978) en Espagne, puis de Sunshine Skyway aux Etats-Unis, sont les premiers à utiliser des haubans constitués de torons de précontrainte : le faisceau de torons parallèles est contenu dans une gaine métallique (Brotonne, Sunshine Skyway) ou en polyéthylène (Rande) injectée au coulis de ciment.



▲ Photo 5 : le pont de Faro



▲ Photo 6 : le pont de Saint-Nazaire

◀ Photo 7 : le pont de Seyssel



▲ Photo 8 : le pont de Brotonne

Au cours des années 1980, la technologie des haubans à torons parallèles a évolué, dans le sens d'une protection individuelle des armatures, et d'une amélioration des performances en fatigue des ancrages par clavettes. Le pont sur la Sambre à Charleroi (1988) et le pont de Wandre (1989), tous deux construits en Belgique, emploient pour la première fois des haubans en torons individuellement protégés sans gaine collective. Cette technique développée par Freyssinet est introduite en France pour le pont du Pertuiset (1988) et sera employée sur près d'une trentaine de ponts dans le monde.



Photo 9 : le pont de Sunshine Skyway



Photo 10 : le pont de Wandre

Dans le même temps, et notamment aux Etats-Unis, de nombreux ponts haubanés sont construits avec une technologie proche de celle du pont de Brotonne : torons clairs parallèles, logés dans une gaine collective injectée au coulis de ciment [21]. Une autre tendance est d'injecter ce type de haubans avec de la cire, comme sur le pont de Ben-Ahin (Stronghold), le Second Pont sur la Severn (Freyssinet) ou le Stade de France (GTM).



Photo 11 : le stade de France

Durant les années 1990, la protection individuelle des torons parallèles a été progressivement complétée : la nécessité de réduire le coefficient de traînée des haubans du pont de Normandie a conduit à entourer les torons individuellement protégés d'une enveloppe constituée de deux demi-coquilles profilées et munies d'une double hélice. Sur les ouvrages construits plus récemment, on peut dire que se sont imposés les haubans constitués d'un faisceau de torons parallèles individuellement protégés, logé dans une gaine continue combinant des fonctions aérodynamiques, esthétiques et de protection contre les effets de l'environnement.

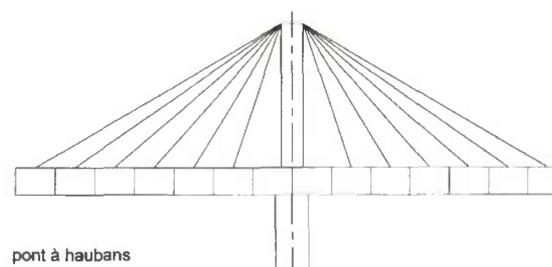
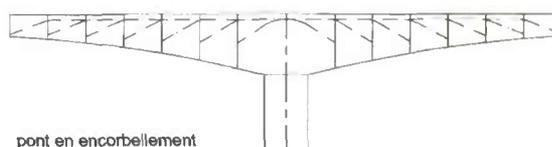
ARTICLE 2.2. FONCTIONNEMENT ET QUALITÉS EXIGÉES DES HAUBANS

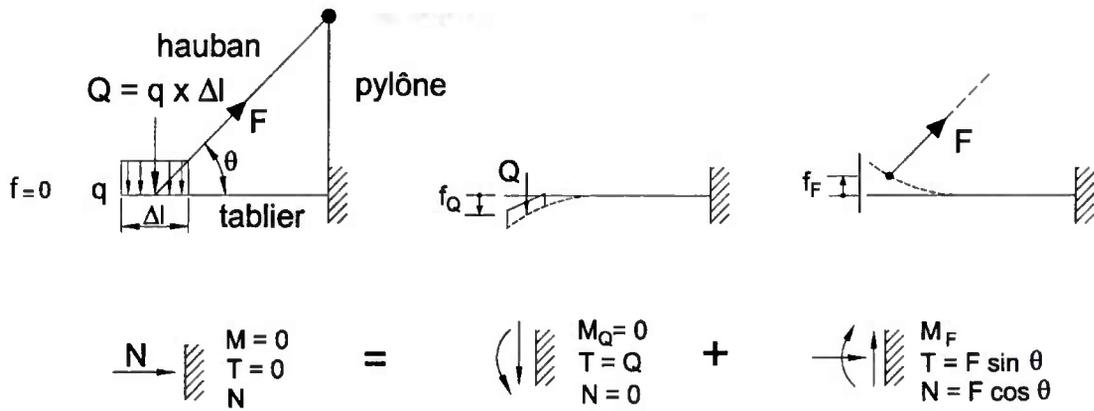
En raison de leur nature et de leur mode d'installation, les haubans sont souvent comparés, et parfois confondus, avec les câbles de précontrainte. Cependant, bien que technologiquement proches, leur nature et leur fonctionnement sont totalement différents.

2.2.1. Surtensions

La tension des câbles de précontrainte longitudinale d'un pont en béton précontraint s'exerce directement sur le tablier et dépend peu des charges appliquées. Les câbles de précontrainte peuvent donc être considérablement tendus lors de leur installation.

Inversement, les câbles d'un pont haubané sont les éléments tendus d'une structure triangulée constituée par le tablier, le pylône et les haubans. Dans cette configuration, la tension des haubans équilibre sensiblement les charges verticales s'exerçant sur le tablier et varie de manière importante avec les charges d'exploitation. Cette tension est réglée lors de l'installation pour optimiser le moment fléchissant dans le tablier.





2.2.2. Charges de fatigue

Les charges d'exploitation induisent des variations de tension des haubans. De même, les effets du vent peuvent générer des vibrations des haubans et de la structure. Ces chargements répétés, même de faible intensité, peuvent endommager par fatigue la capacité de résistance de l'acier des haubans.

L'analyse de la résistance à la fatigue des haubans doit considérer deux aspects complémentaires :

- les contraintes de traction pure dues aux charges d'exploitation, et dont l'amplitude est bien plus grande que pour les câbles de précontrainte ;
- les contraintes de flexion au droit des ancrages, dues principalement aux vibrations des haubans, mais aussi aux déformations relatives des haubans et de la structure. Ces contraintes sont négligeables pour les câbles de précontrainte.

2.2.3. Agressions environnementales

Contrairement aux câbles de précontrainte, les haubans sont directement exposés aux agressions de l'environnement : pluie, vent, rayonnement ultra-violet, cycles gel-dégel, etc. (voir chapitre 3.)

2.2.4. Corollaire sur la conception des haubans

Les haubans, qui constituent les éléments clés de la stabilité des ponts haubanés, doivent offrir les meilleures garanties opérationnelles. L'analyse de leur durabilité doit être menée très sérieusement lors de la conception initiale ou de la qualification d'un procédé de haubanage.

Cependant, les haubans restent les éléments les plus vulnérables de la structure, et il subsiste une part d'aléas dans l'appréciation de leur durabilité. En outre, on ne peut exclure toute possibilité d'accident de la route qui les endommagerait.

C'est pourquoi la conception des haubans doit permettre leur remplacement rapide et sans conséquences nuisibles à l'ouvrage ni sérieuse interruption de trafic. Toutes les dispositions de protection devront garantir des possibilités d'inspection, de réglage et de maintenance, afin d'atteindre la durée de vie souhaitée ou de déterminer la nécessité d'un remplacement.

2.2.5. Catégories d'utilisation

Les procédés de haubanage performants sont sensiblement plus coûteux que les procédés de précontrainte. Afin de limiter ces surcoûts, sur des structures où les câbles sont moins sollicités, une seconde catégorie d'utilisation a été définie (voir chapitres 11. et 14.)

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 3. DURABILITÉ DES HAUBANS

La notion de durabilité des ouvrages haubanés est complexe à définir avec précision car chacun d'eux est un cas d'espèce qui dépend au moins des paramètres suivants :

- conception générale de l'ouvrage ;
- conditions de service ;
- dimensions de l'ouvrage et notamment longueur des haubans ;
- environnement de l'ouvrage (naturel ou industriel, terrestre ou marin, etc.)

Les préoccupations de durabilité des haubans doivent se traduire en plusieurs délais emboîtés, les uns contractuels (délais de garantie et de responsabilité) et les autres fonctionnels spécifiés au stade de la conception. Les tableaux ci-dessous résument l'approche de la durabilité, **dans le contexte juridique français**, pour des haubans remplaçables ou non remplaçables (disposition déconseillée) :

Garanties contractuelles et responsabilités Contexte juridique français			
	❶ garantie dite de parfait achèvement (article 44.1 du CCAG Travaux)	❷ garantie ou responsabilité décennale	❸ garanties particulières (article 44.3 du CCAG Travaux)
Définition	<p>Le délai de garantie dite de parfait achèvement est fixé par l'article 44.1. du CCAG Travaux ; ce délai est d'un an à compter de la date d'effet de la réception.</p> <p>Durant cette période l'entrepreneur a l'obligation dite de parfait achèvement de remédier aux désordres signalés par le maître d'ouvrage, d'exécuter les prestations restantes, de remédier aux imperfections constatées lors de la réception avec réserves.</p>	<p>On utilise :</p> <ul style="list-style-type: none"> - le terme de garantie lorsque l'ouvrage est soumis à des règles relatives à l'Assurance Construction (Bâtiments), - le terme de responsabilité pour les autres ouvrages (article 45 du CCAG Travaux) <p>Le délai de responsabilité décennale résulte des articles 1792 et 2270 du Code Civil. Cette garantie s'applique si les désordres non apparents à la réception affectent la solidité de l'ouvrage et rendent celui-ci impropre à sa construction.</p>	<p>Le marché peut en outre définir des garanties particulières.</p>
Exigences pour les haubans	<p>Le délai de garantie, sauf stipulation différente du marché, est de un an à compter de la date de réception mais il peut être prolongé jusqu'à la levée des réserves et la réparation des désordres.</p>	<p>Le délai de garantie ou de responsabilité est de 10 ans. Les conditions de mise en œuvre de la garantie décennale sont différentes de celles de la responsabilité qui découle du Code Civil.</p>	<p>Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> - protection anti-corrosion des pièces métalliques (fascicule 56 du CCTG) - durabilité des gaines de haubans (exemple 15 ans) - stabilité des couleurs (exemple 8 ans) - bon fonctionnement des amortisseurs (exemple 6 ans)

Nota : Bien que remplaçable, la partie résistante du hauban (armatures et ancrages) est indispensable au bon fonctionnement de la structure ; à ce titre, elle relève de la garantie ou de la responsabilité décennale. En revanche, certains éléments démontables (par exemple les amortisseurs des haubans) relèvent plutôt des garanties particulières.

	Durées d'usage prises en compte à la conception des haubans	
	④ durées d'usage sans entretien	⑤ durée de vie des haubans
Définition	Durée d'usage, sans aucune reprise des composants des systèmes anticorrosion, anti-dégradation, anti-vibration, etc. Définies pour chaque partie des haubans, comme les délais de garantie d'aspect et anticorrosion de la protection des ouvrages métalliques.	Durée totale d'usage des haubans, sans pertes de performances structurelle, fonctionnelle ou esthétique, moyennant maintenance . Justifiée au stade de la conception par des calculs et des essais de fatigue ou d'endommagement physico-chimique.
Exigences pour des haubans non remplaçables	Identiques aux clauses générales. Par exemple : - parties accessibles : 15 ans - parties non accessibles : 100 ans	Durée de vie escomptée de l'ouvrage, sauf prescription contraire. Par exemple : 100 ans
Exigences pour des haubans remplaçables	Identiques aux clauses générales. Par exemple : - parties accessibles : 15 ans - parties non accessibles : 50 ans	Exigences du marché, selon des règles de surveillance et de maintenance. Par exemple la moitié de la durée de vie escomptée de l'ouvrage soit 50 ans pour un ouvrage conçu pour 100 ans.

Ce chapitre analyse les conditions de la durabilité des haubans, pour guider la réflexion des concepteurs et des maîtres d'ouvrage. Cette analyse comporte :

1. l'inventaire des facteurs de vieillissement des haubans ;
2. les conséquences de l'action combinée de ces facteurs ;
3. le choix des matériaux qui en résulte.

Ce chapitre conclut sur les dispositions technologiques nécessaires pour garantir la durabilité des haubans.

ARTICLE 3.1. INVENTAIRE DES FACTEURS DE VIEILLISSEMENT DES HAUBANS

3.1.1. Sollicitations mécaniques

Les sollicitations statiques et dynamiques sont définies aux chapitres 4. à 8. Rappelons celles qui concernent directement le hauban :

- variations d'effort normal liées aux charges d'exploitation ;
- rotations du tablier au droit de l'ancrage du hauban : amplitude importante, de l'ordre de quelques milliradians en fonction de la raideur du tablier, et fréquence faible (fraction de hertz) directement liée à la fréquence du trafic de poids lourds ou de trains sur l'ouvrage. Ces rotations entraînent une flexion du hauban près de son ancrage.
- flexions du hauban liées au vent, à la pluie ou à l'action combinée des deux : vibrations de faible amplitude et de fréquence importante, avec un très grand nombre de cycles.
- flexion statique liée aux erreurs de positionnement des ancrages, dont l'origine est double :
 - défaut de perpendicularité du hauban par rapport à sa face d'appui sur l'ouvrage ;
 - défaut de coaxialité du hauban par rapport au déviateur.

3.1.2. Sollicitations purement environnementales

Les agressions environnementales sur l'ouvrage et les haubans doivent être caractérisées spécifiquement pour chaque projet, afin de mettre en place des solutions capables d'y résister. On peut notamment citer :

- la pluie ;
- le vent et le vent de sable ;
- le soleil (rayonnement ultraviolet, chaleur du rayonnement infrarouge) ;
- les variations thermiques, globales ou différentielles au sein des composants ;
- le froid et ses conséquences (givre, glace, etc. selon la situation géographique) ;
- les projections d'eau provenant de la chaussée, et en période hivernale les projections d'eau salée voire le brouillard salin jusqu'à 5 ou 6 mètres de hauteur ;
- l'atmosphère, par l'oxygène de l'air ou les atmosphères particulièrement agressives d'origine naturelle (bord de mer) ou industrielle de certains sites ;
- les agressions diverses : oiseaux, rongeurs, vandalisme, chocs divers provenant de chargements instables sur des véhicules, etc.
- les incendies de véhicules sur l'ouvrage (voir section 3.1.4.)

3.1.3. Sollicitations provisoires de construction

Il s'agit à la fois :

- des sollicitations de manutention et de mise en place : blessure, déformation excessive, etc. contre lesquelles il faut protéger le hauban par des dispositifs adaptés et des outils bien étudiés ;
- des contraintes mécaniques résultant d'un état statique provisoire en phase de construction : surchargement liés à certaines phases d'exécution, etc.

Les vérifications réglementaires sont communément effectuées pour les éléments structurels en phase de construction, mais il convient également de s'assurer de l'intégrité des éléments de protection (revêtement métallique, gaines, etc.)

3.1.4. Incendie à proximité des haubans

Les incendies de véhicule sur la voie publiques sont des phénomènes courants. De tels incendies ont périodiquement lieu sur ou sous des ouvrages d'art. L'action du feu est complexe à définir, et l'élévation de température provoquée par un incendie dépend en particulier du confinement et de l'apport de matières inflammables. Contrairement aux tunnels, les ponts sont bien ventilés donc relativement peu exposés à de fortes élévations de températures en cas de feu. L'incendie d'un camion citerne transportant des hydrocarbures pourrait toutefois provoquer une élévation de température significative de l'ouvrage.

Sur un pont haubané, on peut craindre l'incendie d'un camion à proximité d'un hauban. Ce fut par exemple le cas en 1999 sur le Second Pont sur la Severn. Un tel incendie ne peut guère concerner plus d'un hauban à la fois, excepté dans le cas d'un groupe de haubans concentrés. La stabilité de la structure n'est donc généralement pas remise en cause si l'ouvrage est dimensionné pour le cas de rupture d'un hauban comme cela est recommandé au chapitre 14.

Certains ouvrages sont toutefois implantés dans des environnements particuliers, par exemple à proximité d'un dépôt de carburant ou d'une raffinerie de pétrole, où la circulation de camions citerne transportant des hydrocarbures est assez fréquente. Dans ce cas, il peut être justifié d'améliorer la résistance au feu des haubans, pour éviter de perdre les armatures en cas d'incendie. Il convient alors de :

- faciliter l'évacuation des matières inflammables sur le tablier par des bouches d'évacuation implantées avec une fréquence suffisante. Ces bouches comportent ou non une récupération des produits d'écoulement, en fonction de l'environnement ;

- limiter l'apport de matières inflammables, en préférant une protection individuelle des armatures à l'injection générale du câble par des produits pétroliers (certains de ces matériaux d'injection, comme les brai époxy, sont plus dangereux que d'autres) ;
- retarder l'élévation de température au niveau des armatures, pendant un délai correspondant à l'extinction du feu, c'est-à-dire une ou deux heures au plus. Des matériaux d'isolation adaptés ont été développés dans ce but par certains fournisseurs (coulis de ciment remplissant les vides entre torons individuellement protégés et enveloppe externe, ou couverture intumescente).

C'est au Maître d'Ouvrage d'indiquer ou non ce cas de charge dans le cahier des charges de l'ouvrage.

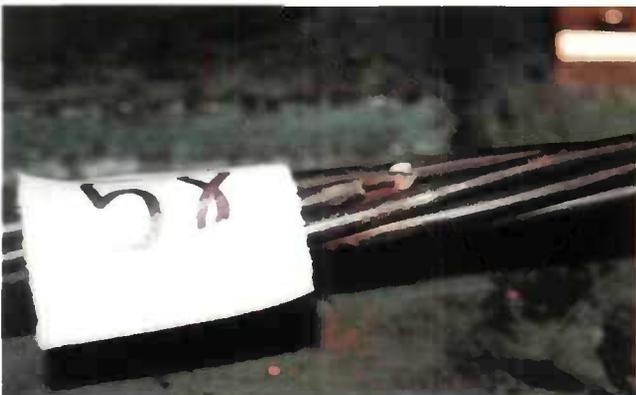
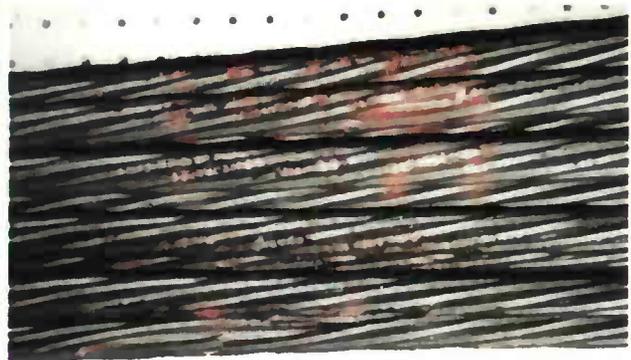
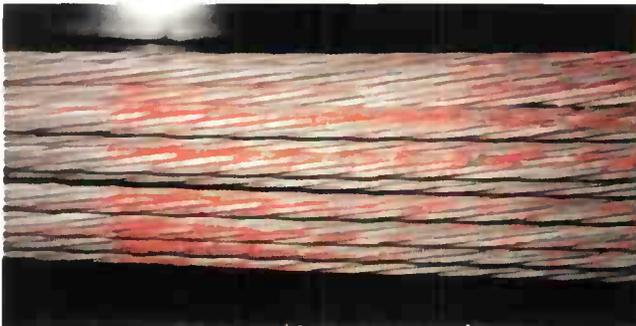
ARTICLE 3.2. EFFETS DES SOLLICITATIONS MÉCANIQUES ET ENVIRONNEMENTALES

3.2.1. Sollicitations mécaniques

Si les sollicitations statiques sur les haubans sont bien appréhendées par l'analyse physique et numérique, les sollicitations dynamiques font plutôt l'objet d'une analyse statistique et/ou probabiliste appuyée sur des résultats d'essais. Les plus complexes sont des combinaisons d'efforts dynamiques de traction et de flexion dont les effets peuvent être simulés par des essais, tels que l'épreuve mécanique de qualification définie au chapitre 11.

Dans toutes les zones de contacts, les sollicitations dynamiques entraînent des phénomènes tribologiques de type **fatigue induite par petits débattements (FIP)** et **usure induite par petits débattements (UIP)** [3]. Le mouvement relatif des pièces en contact, même de très faible amplitude (quelques microns), entraîne une abrasion avec production de débris dont les conséquences sont multiples :

- accroissement des jeux et pénétration de débris dans les joints de grains ;
- oxydation des débris, coulures de rouille dans le cas de l'acier ;
- mise en pression des débris dans l'interface ;
- dislocation et amorce de fissures de fatigue.



▲ Photos 12 et 13 : fatigue et usure induites par petits débattements (FIP et UIP)

▲ Photo 14 : faciès de rupture par fatigue

L'analyse de ces phénomènes nécessite un examen détaillé des conditions du contact :

- amplitude et fréquence des mouvements ;
- effort normal de contact ;
- nature des matériaux au contact ;
- conditions de protection ou de lubrification.

Les conséquences sur la durée de vie en fatigue des câbles soumis à une flexion alternée sont examinées dans le chapitre 6.

Pour tous les assemblages autorisant de petits déplacements relatifs, liés par exemple aux variations de contraintes dans le hauban, il est nécessaire de traiter le contact : traitement de surface, incorporation d'un matériau d'interface ou d'un lubrifiant, etc.

3.2.2. Sollicitation environnementales

Une analyse exhaustive dépasse le champ des présentes recommandations et l'on se borne aux quelques exemples suivants :

3.2.2.1. Eau

L'oxydation est le principal problème des structures en acier. Les haubans, étant constitués d'un grand nombre de fils de faible diamètre, sont donc spécialement vulnérables à la corrosion.

En outre, l'eau n'a pas les mêmes effets selon qu'elle est sous forme de pluie, de condensation ou d'éclaboussures :

- La pluie combinée au vent engendre des phénomènes d'instabilité vibratoire (voir article 4.2.)
- La corrosion de l'acier par l'eau est plus ou moins intense selon les éléments agressifs dissous dans l'eau (dérivés du soufre dans l'atmosphère, dérivés chlorés des sels de déverglaçage, etc.)
- Le temps d'exposition doit être pris en compte : l'accumulation d'eau stagnante dans une enceinte non drainée engendre une sollicitation permanente, critique pour les dispositifs d'étanchéité. Au contraire, l'eau de ruissellement renouvelle les éléments agressifs consommables (oxygène dissous) et peut s'avérer plus nocive.

Il faut donc protéger de l'arrivée d'eau, en confinant ou drainant selon les cas.

3.2.2.2. Soleil

Le soleil agit par son rayonnement :

- Le rayonnement ultraviolet dégrade les chaînes de polymères et rend les matières plastiques fragiles, en catalysant des réactions de photolyse ou de photo-oxydation (voir 3.3.2.1.) ;
- Le rayonnement infrarouge (chaleur) chauffe les composants du hauban, protégés ou non, et engendre des sollicitations thermo-mécaniques.

3.2.2.3. Vent

L'action du vent est source de sollicitations dynamiques sur les haubans décrites au chapitre 4. Le vent agit également sur les polymères, en accélérant l'évaporation des agents protecteurs contre le rayonnement ultraviolet. Enfin, l'action abrasive des vents de sable est parfois déterminante.

3.2.3. Effet conjugué des sollicitations mécaniques et environnementales

Ici encore, on se borne aux exemples suivants :

3.2.3.1. Usure et eau

Les phénomènes FIP et UIP produisent dans l'interface du contact un "troisième corps" constitué des débris de l'abrasion. Dans le cas de l'acier il s'agit d'oxyde de fer (rouille).

Le ruissellement dans l'interface produit des coulures, toujours désagréables sur le plan esthétique, mais cela n'est pas la conséquence la plus grave. Le lavage du troisième corps provoque sa régénération,

accroît le jeu, facilite la circulation d'eau, entraîne sur le métal mis à nu une corrosion par solubilisation et donc une dégradation plus rapide.

C'est un des modes de ruine des câbles de pont à torons multicouches, au niveau des contacts ponctuels entre couches de fils croisées, quand aucun produit de remplissage n'est prévu. Des problèmes similaires peuvent se produire dans les selles de ponts à haubans.

3.2.3.2. Contraintes résiduelles, et environnement

Sur les polyoléfines le phénomène ESC (environmental stress cracking) est maintenant bien connu. Il peut se produire sur des haubans préfabriqués, protégés par des gaines en polyéthylène mal formulées et enroulées sur des bobines de diamètre trop faible.

Exemple de pathologie observée sur des haubans gainés de polyéthylène à haute densité (PEHD) et injectés au coulis de ciment, après seulement une dizaine d'années de service :

1. Lors de l'enroulement, le toronnage des câbles entraîne une certaine torsion, si bien que la gaine est soumise à un cumul torsion et flexion.
2. Le dépassement de la limite élastique du PEHD (limite d'écoulement) entraîne sur la bobine des déformations permanentes irréversibles ("mémoire" du matériau) qui donneront à la gaine déroulée un tracé hélicoïdal.
3. Le cumul de ces contraintes résiduelles et de celles de service (flexion du hauban, dilatation gênée en cas d'injection au coulis de ciment) peut provoquer des fissures de surface qui se propagent par fatigue.
4. L'eau peut alors pénétrer dans le hauban et s'infiltrer jusqu'à l'acier par les inévitables fissures de retrait du coulis de ciment.
5. La "respiration" des fissures étant une zone FIP-UIP, la corrosion de l'acier progresse jusqu'à la rupture du câble.



Photos 15 et 16 : rupture de gaine PEHD de type ESC

ARTICLE 3.3. CHOIX DES MATÉRIAUX

Ce choix concerne non seulement les matériaux de base, en général définis par les sollicitations mécaniques, mais aussi les techniques de mise en œuvre, les traitements à cœur ou en surface et la formulation particulière permettant d'obtenir la durabilité requise.

Les principes technologiques propres à chaque procédé de haubanage sont définis dans les chapitres 9. et 10. Les exemples ci-dessous fournissent quelques bases de jugement des propositions.

3.3.1. Acier

3.3.1.1. Câbles en acier

Le choix de l'acier des câbles et de leur mode d'élaboration est étroitement lié à la tenue en fatigue axiale sous 2 millions de cycles. Dans le cas de structures légères, les câbles sont soumis à une amplitude de contrainte importante et il convient, là aussi, d'être vigilant au choix du type de câble. C'est pourquoi la catégorie B des normes sur les fils ou torons est systématiquement préconisée (voir chapitre 9.)

La résistance à 2 millions de cycles de fatigue axiale n'est cependant pas une garantie suffisante de durabilité, en particulier pour les produits comportant des contacts interfils non protégés vis-à-vis des phénomènes tribologiques détaillés en 3.2.3.1. Le choix de l'acier du toron doit donc être associé à un traitement des contacts permettant de se prémunir des phénomènes FIP et UIP : traitement de surface et lubrification, combinés à une protection anticorrosion. Le choix de torons galvanisés est donc recommandé au chapitre 9. car la galvanisation est le seul procédé industriel qui ait largement fait ses preuves en la matière.

3.3.1.2. Autres pièces en acier

Le choix de l'acier des têtes d'ancrage, des organes de transfert et des dispositifs d'ancrage (mors ou manchons) doit être guidé par une analyse semblable à celle des câbles, tenant compte de leurs spécificités de forme et de fonction. La durabilité de ces organes dépend aussi :

- de leur mode d'élaboration (forge, fonderie, laminage) ;
- des traitements qu'ils reçoivent (thermique, thermo-chimique, de surface) ;
- de la combinaison de matériaux différents, en évitant les incompatibilités.

Il convient enfin de détecter et d'exclure tout défaut (fissures, porosités, soufflures, tapures, etc.) par des exigences sur le processus de fabrication et des contrôles adéquats (radiographie, ultrasons, ressuage, IRM, etc.)

3.3.2. Matières plastiques

Des matières plastiques sont utilisées sur les haubans : les plus courantes sont les polyoléfines, et les gaines de PEHD en particulier. Il convient d'analyser avec soin, et de manière spécifique à chaque matériau, le vieillissement de ces matières plastiques.

Dans tous les cas, il importe de contrôler la constance de formulation des lots de fabrication utilisés pour un projet. L'utilisation de produits vierges pour l'extrusion est une condition importante de la qualité, mais la garantie de durabilité exige d'autres critères, à définir avec la production, en fonction des spécificités du projet.

3.3.2.1. Gains extérieures en PEHD

La principale cause de vieillissement des gaines en PEHD exposées au soleil est la photo-oxydation des chaînes de polymère, donnant lieu à la formation de carbonyles, puis à la perte des propriétés mécaniques du PEHD.

Il convient donc de formuler le PEHD avec des agents anti-oxydants et anti-ultraviolets pour obtenir des gaines de durabilité suffisante. Le noir de carbone, introduit dans les gaines de PEHD noires conformes à la norme NF 114, permet par exemple d'absorber les ultraviolets, à condition que sa dispersion soit homogène. Il est remplacé par d'autres agents chimiques dans les gaines de couleur. L'efficacité de ces agents doit être analysée par des essais de vieillissement accéléré.

La mise au point et l'interprétation de ces essais est basée sur une étude de l'endommagement physico-chimique du matériau, en prenant en compte l'agressivité de l'environnement où sera placée la gaine (intensité du rayonnement ultraviolet en fonction de la situation géographique de

l'ouvrage) et les facteurs accélérateurs (température, vent, etc.) Ces essais permettent également de vérifier la stabilité de la couleur.

3.3.2.2. Torons gainés

Une analyse particulière est nécessaire pour les gaines de torons individuellement gainés, où le PEHD est directement au contact de l'acier. Le rôle de l'interface acier-PEHD s'avère primordial : l'action différentielle de la chaleur sur l'acier et le PEHD, par suite de la différence des coefficients de dilatation, doit être prise en compte dans la conception du système de haubanage. Un matériau d'interface est indispensable (il sert généralement aussi à colmater les vides inter fils du toron).

L'expérience acquise montre que l'absence complète de produit d'interface entre l'acier et le PEHD engendre des fissurations de gaine, plus ou moins importantes dans le temps, provoquées par les variations de température.

3.3.3. Peinture de la partie courante des Torons Multi-Couches (TMC)

Le vieillissement des systèmes de protection par peinture affecte à la fois :

- l'aspect et la tenue de la couleur, justifiant des exigences sur le pigment ;
- la protection anticorrosion et la tenue mécanique, justifiant le choix de la résine.

Comme pour toutes les structures métalliques, la qualité de la préparation de surface est capitale pour la durabilité de la peinture. Le recours au grenailage est admis seulement lorsque des dispositions garantissent l'absence de grains dans le câble en fin d'opération. Il convient aussi d'apporter un grand soin à la protection des assemblages mécaniques mobiles ou semi-mobiles. En effet la présence de grains dans le câble ou les assemblages pourrait sérieusement compromettre leur tenue en fatigue.

Sur la peinture, comme pour les matières plastiques, la conjonction de contraintes mécaniques et d'agressions environnementales entraîne une accélération du vieillissement. Cela doit être pris en compte dans le mode opératoire d'application initiale de la peinture, avant ou après la mise en tension des haubans, ainsi que lors des opérations de renouvellement de la peinture.

ARTICLE 3.4. BESOIN DE REMPLAÇABILITÉ

L'analyse de la durabilité doit être menée très sérieusement lors de la conception initiale ou de la qualification d'un procédé de haubanage. Comme il subsiste malgré tout une part d'aléas dans l'appréciation du vieillissement futur, il est indispensable de prévoir des haubans remplaçables et facilement visitables.

La remplaçabilité est conditionnée par le mode d'accrochage du hauban à la structure. En particulier, les assemblages des organes de protection dans la zone d'ancrage doivent être réversibles plutôt que permanents (filetages plutôt que soudures).

La visitabilité des haubans, par des méthodes directes ou indirectes, visuelles, dynamiques ou acoustiques (voir chapitre 13.) impose les dispositions technologiques suivantes :

- possibilité d'ouvertures d'accès à l'examen visuel ou au prélèvement d'éléments en vue d'un contrôle de vieillissement ;
- protections supportant les démontages répétés ;
- mise en place de systèmes de mesure interrogeables à distance en permanence.

CHAPITRE 4. VIBRATIONS DES HAUBANS

Lorsqu'ils sont soumis à une excitation périodique, les haubans peuvent, dans certaines conditions, accumuler de l'énergie et osciller avec des amplitudes importantes. Ces oscillations mettent rarement l'ouvrage en danger, mais elles sont inquiétantes pour les usagers et peuvent, si elles ne sont pas maîtrisées, endommager les haubans en fatigue.

Il existe de nombreux exemples de ponts ayant soufferts de sévères vibrations de leurs haubans. L'un des premiers fut le Pont de Brotonne, en 1977 en France. Plus récemment, on peut citer le Second Pont sur la Severn au Royaume Uni, le Pont Erasmus aux Pays-Bas et le Pont Fred Hartman au Texas.

Les causes de vibration des haubans sont de deux types :

- déplacement des ancrages, sous l'effet des charges de trafic ou du vent agissant sur l'ouvrage (tablier ou pylônes) ;
- effets du vent agissant directement sur les haubans.

Le risque de vibration des haubans doit être pris en compte dès la conception d'un ouvrage. Si des instabilités imprévues se produisent sur un ouvrage achevé, un diagnostic précis est nécessaire pour prendre des mesures correctives adaptées.

Le présent chapitre s'inspire largement d'un article de M. VIRLOGEUX [26] et détaille les phénomènes aérodynamiques responsables des vibrations des haubans pour proposer des mesures correctives. Cette approche physique est complétée par le chapitre 8 qui présente les outils mathématiques de l'analyse dynamique des haubans.

L'article rappelle d'abord les paramètres aérodynamiques d'un câble. Puis l'article 4.2. présente de façon organisée les phénomènes physiques pouvant entraîner des vibrations. L'article 4.3. décrit les actions permettant de combattre ces vibrations. Enfin, ce chapitre se conclut par des recommandations sur une approche globale de la vibration des haubans.

ARTICLE 4.1. PARAMÈTRES DYNAMIQUES D'UN HAUBAN

4.1.1. Traînée d'un hauban

L'effort de traînée (statique) du vent sur un hauban est donné par :

$$F_d = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_D \quad (1)$$

où ρ est la densité de l'air (1,23 kg/m³ dans les conditions normales de température et de pression), U est la vitesse du vent, D le diamètre extérieur du câble et C_D le coefficient de traînée (dénommé C_{f0} dans l'Eurocode 1).

Dans le cas classique des gaines circulaires, la valeur du coefficient de traînée dépend de la vitesse du vent, ou plus précisément du nombre de Reynolds R_e :

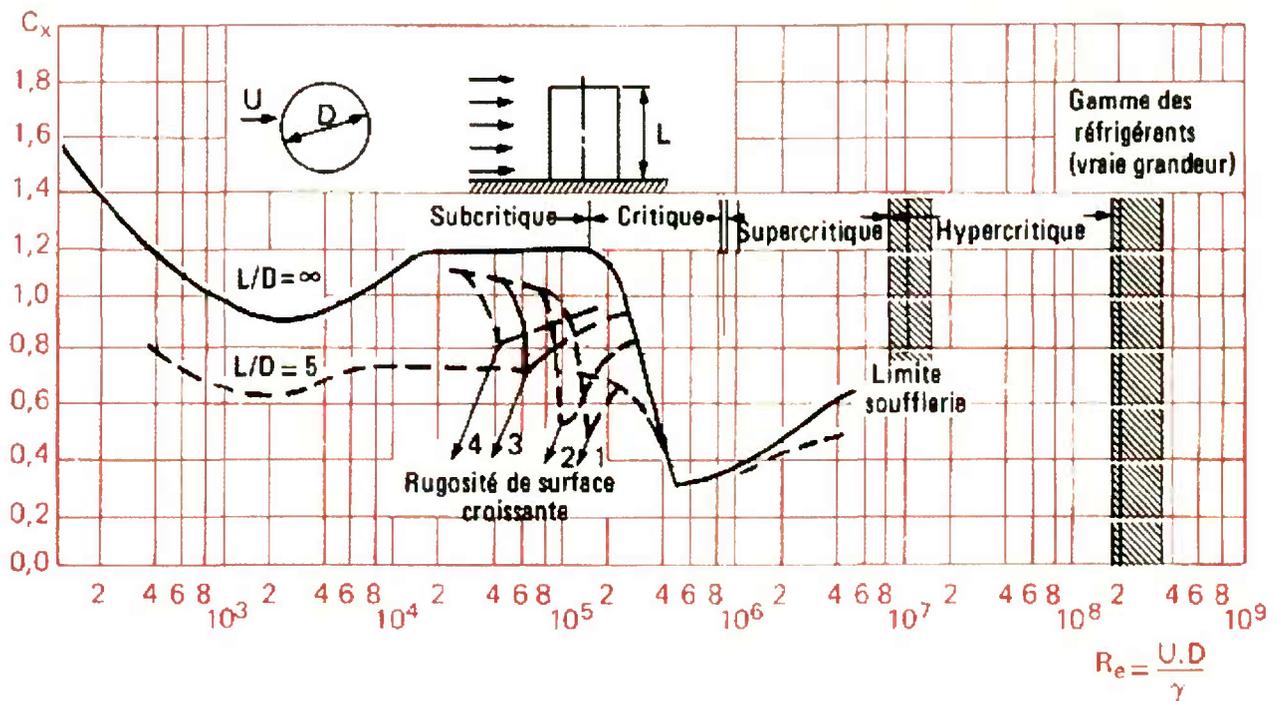
$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (2)$$

où ν est la viscosité cinématique de l'air (15.10⁻⁶ m²/s dans les conditions normales de température et de pression).

Comme l'indique le diagramme ci-dessous, on observe trois domaines pour la valeur de C_D :

- pour de faibles valeurs de R_e , dans le domaine subcritique, C_D est relativement élevé, de l'ordre de 1,2 ;
- dans le domaine supercritique, au dessus d'une valeur critique du nombre de Reynolds variant de $2 \cdot 10^5$ à $8 \cdot 10^5$ selon la rugosité de la gaine, le coefficient de traînée chute à 0,5 ou 0,6 ;
- pour des valeurs plus élevées de R_e , dans le domaine hypercritique, le coefficient de traînée croît pour atteindre un palier qui dépend à nouveau de la rugosité.

Dans la plupart des ouvrages, les haubans se trouvent dans le domaine supercritique pour les valeurs extrêmes de la vitesse du vent, et l'on adopte généralement une valeur de 0,7 pour le coefficient C_D afin de couvrir l'évolution de la rugosité des gaines dans le temps, avec le dépôt de poussière et l'altération des matériaux.



Evolution du coefficient de traînée du cylindre en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement

4.1.2. Amortissement d'un hauban

L'amortissement d'un hauban provient de frottements internes entre les éléments constitutifs du câble ou des ancrages ; il est caractérisé par plusieurs paramètres. Dans les équations de la dynamique, la force d'amortissement par unité de longueur peut être modélisée à partir d'une constante d'amortissement visqueux notée γ et de la vitesse de déplacement transversal du hauban (voir article 8.3.) :

$$F_{\text{amort}} = -\gamma \frac{\partial y}{\partial t} \quad (3)$$

Si l'on désigne par μ la masse linéique du hauban et ω_1 sa pulsation fondamentale, l'amortissement rapporté au critique ξ est défini par :

$$\xi = \frac{\gamma}{2\mu\omega_1} \quad (4)$$

Enfin, on définit par décrement logarithmique d'un hauban le logarithme du rapport, que l'on note δ , des amplitudes de deux oscillations libres successives :

$$\delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (5)$$

L'amortissement rapporté au critique ξ étant naturellement faible pour un hauban, on montre que $\delta = 2\pi\xi$ pour des oscillations d'amplitude modérée.

L'amortissement total d'un hauban est la somme de son **amortissement intrinsèque** et de l'**amortissement aérodynamique** : $\delta_{\text{tot}} = \delta_i + \delta_a$. Ce dernier augmente avec la vitesse du vent comme on le verra ci-dessous, si bien que les problèmes de vibrations liés à une insuffisance d'amortissement sont souvent plus critiques pour des vents modérés que pour des vents extrêmes.

L'amortissement intrinsèque δ_i d'un hauban provient des frottements internes entre armatures constitutives du câble et entre pièces constitutives de l'ancrage. Il dépend donc fortement de la technologie de hauban employée et l'on peut retenir les ordres de grandeurs suivants :

- câbles multi-torons parallèles (MTP) protégés individuellement : $\delta_i \approx 0,9$ à $1,2$ % ;
- câbles multi-fils parallèles (MFP) et multi-torons parallèles protégés collectivement par un produit souple : $\delta_i \approx 0,6$ à $1,8$ % ;
- câbles multi-fils parallèles et multi-torons parallèles (torons nus) injectés au coulis de ciment : $\delta_i \approx 0,05$ à $0,1$ % ;
- câbles torons multi-couches (TMC) : $\delta_i \approx 0,3$ à $0,6$ % en fonction du produit de colmatage.

L'amortissement décroît généralement lorsque la longueur du câble augmente, puisque les frottements localisés aux ancrages se "diluent" sur une plus grande portée. En outre, les frottements internes du hauban peuvent engendrer des problèmes de fatigue ou d'usure (voir chapitre 3.) nuisibles à la résistance des haubans. Ce qui est favorable d'un côté – un amortissement important – peut être néfaste par d'autres aspects.

L'amortissement aérodynamique provient du frottement du hauban sur l'air, ou plus exactement de la vitesse relative du hauban en vibration par rapport à l'écoulement du vent. Pour un déplacement relatif du hauban dans la direction du vent, l'amortissement aérodynamique (décrément logarithmique) du mode k vaut :

$$\delta_a = \frac{\rho\pi UDC_D}{\mu\omega_k} \quad (6)$$

où μ est la masse linéique du hauban, ω_k la pulsation propre du mode k et les autres notations sont définies plus haut.

Pour un déplacement relatif du hauban orthogonal à la direction du vent, l'amortissement aérodynamique (décrément logarithmique) du mode k vaut :

$$\delta_a = \frac{\rho\pi UDC_D}{2\mu\omega_k} \quad (7)$$

On constate que l'amortissement aérodynamique est deux fois plus faible pour des vibrations dans un plan vertical (c'est-à-dire perpendiculaire à la direction du vent) que pour des vibrations transversales (selon la direction du vent). Ce résultat est certainement l'un des facteurs qui font que les haubans sont, le plus souvent, le siège de vibrations verticales avec de faibles composantes transversales.

ARTICLE 4.2. PHÉNOMÈNES PHYSIQUES ENGENDRANT DES VIBRATIONS

4.2.1. Détachement tourbillonnaire (vortex shedding)

Ce phénomène est assez classique : lorsqu'un écoulement fluide rencontre un obstacle non profilé, le sillage présente des tourbillons de Von Karman, tournant alternativement dans un sens puis dans l'autre. Ces tourbillons sont dus au détachement de la couche limite de l'écoulement autour de l'obstacle, et s'accompagnent d'une force transversale périodique sur l'obstacle.

La fréquence du détachement tourbillonnaire est donnée par le nombre de Strouhal S_f :

$$N = \frac{U S_f}{D} \quad (8)$$

où U est la vitesse du vent et D le diamètre extérieur du câble. Pour un cylindre circulaire, le nombre de Strouhal S_f vaut 0,20.

Pour une vitesse de vent déterminée, l'échappement tourbillonnaire peut donc exciter un mode propre de vibration du hauban. Toutefois, on s'aperçoit que la vitesse de vent permettant d'exciter les premiers modes d'un hauban ($N < 2$ Hz) est assez faible, de l'ordre de quelques mètres par seconde ; l'énergie d'un tel vent est très limitée. En outre, des phénomènes complexes d'amortissement liés à l'échappement tourbillonnaire limitent l'amplitude des vibrations ainsi engendrées à une fraction du diamètre du hauban. C'est pourquoi ce phénomène ne constitue généralement pas un danger pour les câbles.

4.2.2. Effet de sillage (wake galloping)

Il existe plusieurs effets de sillage différents, désignant tous l'action sur un hauban des tourbillons de Von Karman créés par un obstacle en amont de l'écoulement.

Les câbles d'un pont haubané peuvent se trouver dans le sillage d'un élément de structure. Le cas classique est celui des ponts à deux nappes de haubans soumis à un vent oblique : certains haubans de la nappe aval peuvent se trouver dans le sillage de la jambe de pylône amont, en particulier pour les pylônes à forme en H. Les turbulences provoquées par l'élément de structure peuvent exciter la vibration du mode k des haubans si le vent a la vitesse critique suivante :

$$U_c = \frac{N_k D_{pyl}}{S_{pyl}} \quad (9)$$

où S_{pyl} et D_{pyl} sont le nombre de Strouhal et la dimension transversale de l'élément de structure engendrant les tourbillons. Ce type de vibration se serait produit sur le pont d'Evripos.

L'obstacle créant les tourbillons peut être un hauban. C'est le cas lorsque le vent est quasiment parallèle à l'axe du pont : les haubans amonts pourraient alors provoquer l'excitation des haubans aval. Cependant, du fait de la fréquence de l'échappement tourbillonnaire sur un câble, et des distances entre haubans, ce phénomène ne peut pas se développer pour des vitesses de vent importantes, et ne présente donc pas de danger.

Une exception concerne les câbles groupés, par exemple les câbles de stabilisation en travée de rive. Les distances entre câbles sont alors beaucoup plus réduites et justifient des précautions contre les effets de sillage, telles que des connexions rigides entre câbles.

Enfin, un effet de sillage plus complexe peut se produire sur les haubans jumelés. Des haubans de ce type, constitués d'une paire de câbles parallèles ancrés au même niveau sur le tablier et le pylône, sont souvent utilisés au Japon pour limiter la dimension des câbles. Ils l'ont aussi été sur le pont d'Oresund, les deux câbles jumelés étant alors à la verticale l'un de l'autre.

Le câble aval est dans le sillage du câble amont, et peut être excité par les tourbillons créés par ce dernier. Une interaction spécifique se développe entre les deux câbles, car les vibrations du câble

aval peuvent perturber l'écoulement autour du câble amont. Ce phénomène dépend de l'espacement entre axes des câbles, et semble critique pour des espacements de l'ordre de 3 à 4 diamètres, c'est-à-dire la dimension des tourbillons de Von Karman [19].

4.2.3. Action du vent turbulent (buffeting)

Le vent turbulent a une action dynamique sur les câbles, de même que sur toute structure souple. Ces effets dépendent de la vitesse du vent, de l'intensité de la turbulence, et des paramètres aérodynamiques des haubans. Ils peuvent être appréhendés en calculant la réponse des haubans au vent turbulent – amplitude maximale, déviations angulaires aux ancrages – à l'aide de logiciels spécialisés, après une caractérisation adéquate du vent sur le site.

L'amplitude des vibrations augmente avec la vitesse du vent, mais cet effet n'est pas dangereux par lui-même. En effet, contrairement aux phénomènes d'instabilité qui peuvent engendrer des vibrations de grande amplitude sous des vitesses de vent modérées, la réponse au vent turbulent n'atteint des amplitudes extrêmes que sous des vents exceptionnels et engendre peu de phénomènes de fatigue. En outre, l'amortissement aérodynamique des câbles (voir 4.1.2.) ainsi que la tension relativement élevée sous charges permanentes limitent les vibrations.

Il convient de signaler deux cas particuliers où la vibration des haubans sous vent turbulent peut poser des problèmes :

- en cas d'utilisation d'aiguilles de stabilisation, le vent turbulent peut provoquer des chocs dans ces aiguilles, si elles ne sont pas assez tendues ; ces chocs peuvent provoquer la rupture des aiguilles ou de leur ancrage ;
- la vibration des haubans sous vent turbulent peut provoquer une instabilité aérodynamique sur les ponts à deux nappes de haubans : les turbulences frappant les haubans côté amont arrivent ensuite sur les haubans côté aval avec un retard B/U , où B est l'espacement entre les deux nappes de haubans. Si ce retard correspond à la moitié de la période propre de torsion du tablier, une instabilité en torsion de l'ouvrage est possible.

4.2.4. Galop (galloping)

Le galop désigne une instabilité aéroélastique qui peut se produire pour certaines structures élastiques mal profilées placées dans un écoulement laminaire. Cette instabilité, normalement régie par l'analyse des écoulements instationnaires, peut être mise en évidence par une analyse quasi-stationnaire.

Considérons par exemple un profil se déplaçant transversalement au vent avec une vitesse $y'(t)$, la vitesse moyenne du vent étant U . Alors le vent attaque le profil avec un angle d'incidence

$i(t) = -\tan^{-1} \frac{y'(t)}{U}$ et pour de petits angles, l'effort transversal exercé par le vent sur le profil est de la forme :

$$F_y(t) = -\frac{1}{2} \rho U^2 B \left[\frac{\partial C_L}{\partial i} + C_D \right] \frac{y'(t)}{U} \quad (10)$$

où C_L et C_D sont respectivement les coefficients de portance et de traînée du profil, mesurés dans le référentiel du vent et B la largeur du profil. Le comportement du profil dans l'écoulement est celui d'un oscillateur linéaire dont l'amortissement (terme en y') est de la forme :

$$\gamma = 2\mu\xi\omega_1 + \frac{1}{2} \rho U B \left[\frac{\partial C_L}{\partial i} + C_D \right] \quad (11)$$

Pour certains profils (portance à forte dérivée négative), le terme entre crochets peut être suffisamment négatif pour que l'amortissement total de l'oscillateur soit négatif, conduisant alors à une instabilité aéroélastique appelée galop.

Par raison de symétrie, la portance d'un cylindre circulaire est nulle pour tout angle d'incidence, si bien que l'écoulement du vent autour d'un hauban circulaire ne peut pas engendrer de phénomène de galop, y compris pour des vents "obliques".

Cependant des développements théoriques, fondés sur des résultats expérimentaux japonais, prétendent établir une corrélation entre le risque de galop et le nombre de Scrutton S_c :

$$S_c = \frac{\mu \xi}{\rho D^2} \quad (12)$$

D'après ces recherches, il n'y aurait pas de risque de galop pour des vitesses de vent inférieures à la vitesse critique :

$$V_c = 35 DN_k \sqrt{S_c} \quad (13)$$

où N_k est la fréquence propre du mode k . Cette formule – extrêmement conservatrice – est en contradiction avec la stabilité des ouvrages existants, et ne paraît pas fondée sur des données expérimentales suffisantes ; c'est pourquoi, sous réserve de résultats complémentaires, on peut affirmer que les haubans circulaires ne présentent pas de risque de galop.

En revanche, des phénomènes de galop sont possible dès que le profil du hauban présente une certaine asymétrie susceptible d'engendrer des efforts de portance. C'est le cas par exemple d'un faisceau de torons parallèles rangés selon une disposition hexagonale et sans gaine générale. Les torons multicouches à fils extérieurs circulaires peuvent également produire des phénomènes de galop, sous certaines conditions de pas d'enroulement. Enfin, un dépôt de glace sur un hauban modifie la forme aérodynamique du câble et peut engendrer une instabilité, à l'exemple des lignes électriques.

4.2.5. Phénomène pluie + vent (rain-wind induced vibrations)

L'excitation combinée pluie + vent est un phénomène qui fut mis en évidence par des chercheurs japonais, dont le premier fut Y. Hikami. Sous certaines conditions de vent, et par temps de pluie, l'eau qui descend le long de la surface du câble s'organise selon deux filets d'eau, l'un en équilibre stable en fibre inférieure du hauban, et l'autre en équilibre instable en fibre supérieure. Ce dernier est placé à l'angle d'azimut où s'équilibrent les effets de la gravité, de la capillarité et du vent.

La présence de ces filets d'eau modifie le profil aérodynamique du câble. De plus, le mouvement oscillant du filet d'eau supérieur provoque des efforts aérodynamiques variables, qui engendrent une instabilité du hauban. L'amplitude des vibrations du hauban sous excitation combinée pluie + vent peut atteindre plusieurs mètres.

L'instabilité pluie + vent a été observée dans les conditions suivantes :

- L'intensité de la pluie est sans importance, sauf en cas de pluie trop abondante pour permettre aux filets d'eau de se former.
- Le vent doit être oblique, avec un angle d'azimut compris entre 30° et 80°, et tendre à "soulever" les haubans considérés. L'instabilité pluie + vent se développe pour des vitesses de vent modérées, comprises entre 8 et 15 m/s. Il semblerait que la turbulence du vent limite le phénomène, sans doute parce qu'elle empêche l'organisation des filets d'eau.
- Le diamètre des gaines est sans importance mais leur état de surface joue un grand rôle. L'instabilité pluie + vent a été observée sur des gaines en acier peint (pont de Brotonne en 1977 avant la mise en place des amortisseurs), en acier inoxydable (pont de Wandre) ou en PEHD. Si la surface est trop lisse, le filet d'eau supérieur ne peut pas se former, mais l'augmentation de la rugosité liée au dépôt de poussière sur le hauban permet à l'instabilité pluie + vent de s'établir.
- Les oscillations les plus couramment observées ont une fréquence de 1,0 à 3,0 Hertz et sont verticales.

4.2.6. Excitation paramétrique

La vibration des haubans peut être provoquée par le déplacement périodique de leurs ancrages, et donc par des oscillations de l'ouvrage engendrées par l'action du vent sur le tablier ou les pylônes ou par l'action du trafic.

Un déplacement périodique quelconque d'un ancrage peut être décomposé en déplacement transversal, d'une part, et déplacement longitudinal, d'autre part. Les résultats théoriques des articles 8.3. et 8.4. permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le déplacement transversal d'un ancrage peut engendrer un phénomène de résonance classique. La réponse du hauban présente une amplitude maximale lorsque la pulsation d'excitation correspond à une pulsation propre. Cette amplitude est limitée par l'amortissement du hauban (voir équation (146)).
- Le déplacement longitudinal d'un ancrage peut engendrer un phénomène de résonance paramétrique, qui s'apparente à une instabilité, lorsque la pulsation d'excitation est double d'une pulsation propre du hauban. L'amplitude de la réponse ne dépend pas de l'amortissement du hauban (voir équation (156)).

L'excitation paramétrique est responsable de vibrations de grande amplitude, pouvant atteindre plusieurs mètres, y compris pour des vents modérés. Elle est d'autant plus à craindre que la structure est mal profilée : tabliers bipoutres notamment. Le déplacement des ancrages du tablier est généralement prépondérant, mais certains pylônes non contreventés pourraient se déplacer sous l'action du vent et engendrer une résonance paramétrique (Pont d'Oresund par exemple).

4.2.7. Respiration des torons (rattling)

Lorsque les haubans sont constitués d'un faisceau ouvert de torons (câble MTP individuellement protégés sans gaine générale, faisceau de câbles TMC, voir chapitre 9.) des interactions aérodynamiques se produisent entre torons. Les torons périphériques s'éloignent et se rapprochent périodiquement du faisceau, choquant les torons centraux et engendrant finalement une vibration d'ensemble du hauban.

Ces mouvements, souvent dénommés respiration des torons, produisent un bruit de claquement violent et désagréable. Ils sont évités en plaçant des colliers de serrage à intervalles réguliers sur le faisceau de torons, ou mieux, en logeant ce faisceau dans une gaine générale.

Dans ce dernier cas, la gaine générale interdit toute action directe du vent sur les torons. Lorsque les torons sont individuellement protégés, la gaine n'est habituellement pas injectée et repose simplement sur le faisceau de torons. Si des vibrations importantes se produisent pour une autre raison, par exemple l'action du vent turbulent, il est possible que l'accélération verticale du hauban dépasse celle de la gravité, si bien que la gaine pourra "décoller" du faisceau de torons. Les vibrations de grande amplitude peuvent ainsi s'accompagner d'un claquement sonore de la gaine sur le faisceau de torons, sans gravité pour le hauban, mais désagréable pour le voisinage, comme par exemple sur le pont de Glebe Island en Australie.

ARTICLE 4.3. ACTIONS CORRECTIVES

Ces actions sont de trois types : amortissement, profilage du câble et mise en place d'aiguilles.

4.3.1. Amortisseurs

Les câbles de hauban présentent un amortissement intrinsèque assez faible (voir 4.1.2.) La façon la plus classique de limiter ou éviter la vibration des haubans consiste à augmenter leur amortissement au moyen d'amortisseurs. Cette mesure est efficace contre presque tous les types de vibration, à l'exception de l'instabilité paramétrique. D'après les données de la littérature, on évite par exemple l'instabilité pluie + vent dès que le décrément logarithmique des haubans est supérieur à 3,0 %.

On distingue plusieurs types d'amortisseurs :

- **Amortisseurs externes**, généralement hydrauliques, exerçant une force d'amortissement transversalement au câble, à proximité des ancrages. Ils peuvent être installés par paires, directement sur le hauban, comme sur le pont de Brotonne ou à l'extrémité d'un balancier comme sur le pont de Normandie.

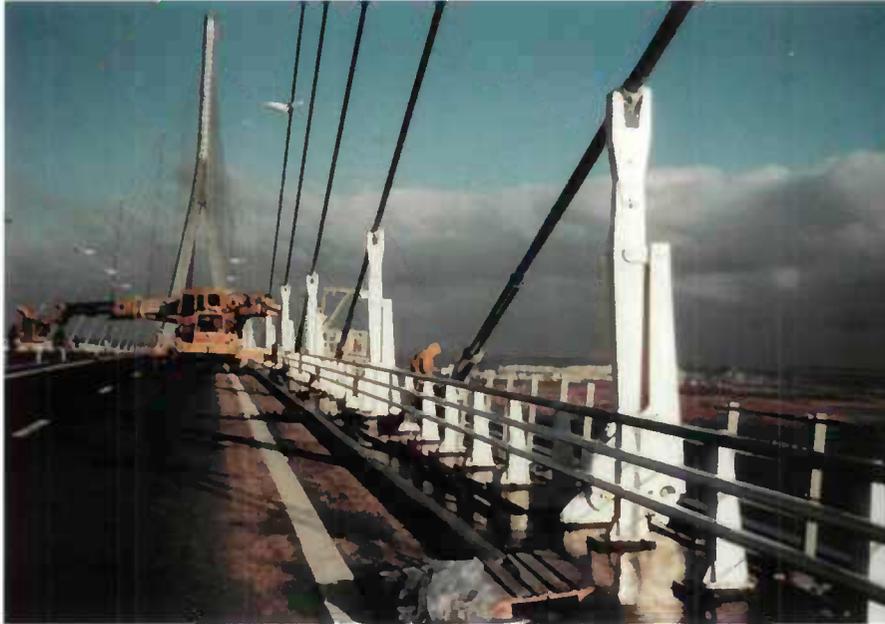
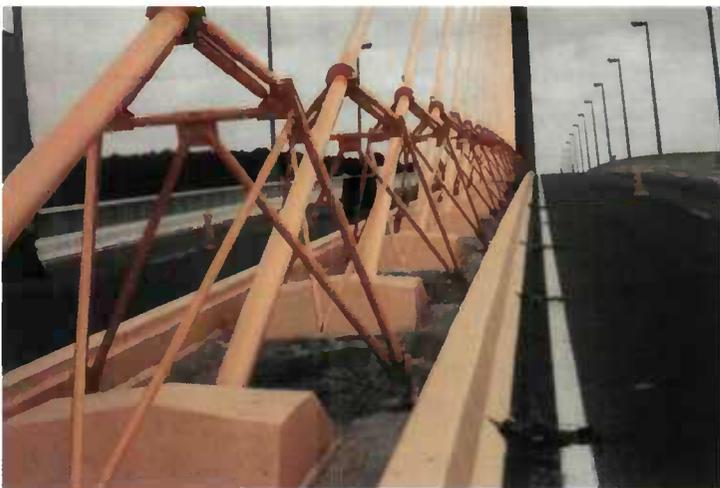


Photo 17 : amortisseurs du pont de Normandie



▲ Photo 18 : amortisseurs du pont de Brotonne

Photo 19 : amortisseur du pont Vasco de Gama sur le Tage ►



- **Amortisseurs internes**, de forme annulaire, placés entre le câble et un tube métallique lié rigidement à la structure, à proximité de l'ancrage haut ou bas. Ces amortisseurs fonctionnent par distorsion d'un matériau dissipant (néoprène spécialement formulé) ou par frottement visqueux, comme sur les ponts sur le Tage, d'Oresund ou de Seohae, ou encore par frottement sec entre deux solides, comme sur le pont d'Uddevalla.

La conception et les règles de dimensionnement de ces amortisseurs sont généralement propriété du fournisseur, mais il convient de prêter attention aux points suivants.

Des considérations pratiques et esthétiques conduisent souvent à privilégier des amortisseurs internes. Cependant, un amortisseur est d'autant plus efficace que son point d'action sur le câble est plus éloigné des ancrages. En particulier, pour une configuration géométrique donnée, l'amortissement obtenu ne peut pas dépasser la limite théorique suivante (décrément logarithmique) :

$$\delta_{\text{opt}} = \pi \frac{x_D}{l} \quad (14)$$

où x_D est la distance entre l'amortisseur et l'ancrage le plus proche et l la longueur du hauban.

Si ce maximum théorique est insuffisant avec un amortisseur interne, il est nécessaire d'éloigner l'amortisseur de l'ancrage, en vérifiant que l'effort exercé par l'amortisseur sur son tube de fixation à la structure reste admissible. En cas contraire, on peut éventuellement utiliser un amortisseur externe.

L'objectif d'un amortisseur est de réduire l'amplitude des vibrations des haubans. Mais contrairement à un guide qui bloquerait complètement les déplacements du câble, une certaine amplitude de déplacement est indispensable pour que la force d'amortissement puisse développer un travail résistant et dissiper de l'énergie. Il est souhaitable que l'amortisseur joue son rôle dès les plus petites oscillations. Les amortisseurs visqueux sont donc préférables à ceux qui présentent un effet de seuil (frottement sec).

Les paramètres d'amortissement et d'élasticité d'un amortisseur doivent être réglables et adaptés au cas par cas aux caractéristiques du hauban, pour se rapprocher autant que possible de l'optimum théorique. Les critères de réglage précis sortent du champ de ces recommandations (voir par exemple [12]), mais les situations extrêmes suivantes permettent d'appréhender de façon qualitative l'existence d'un optimum :

- un amortisseur trop "lâche" autorise des courses de hauban suffisantes mais exerce sur le câble un effort résistant très limité ; il absorbe donc peu d'énergie ;
- inversement, un amortisseur trop "visqueux" exerce un effort résistant élevé mais absorbe peu d'énergie en limitant trop étroitement la course du hauban.

La recherche du réglage optimal doit également prendre en compte :

la loi de comportement réelle, souvent non linéaire en Cy^α avec α compris entre 0 et 1, et dépendant généralement de la température ;

l'élasticité éventuelle de l'amortisseur, qu'il convient de limiter car elle limite l'énergie absorbée à course de hauban donnée.

Enfin, il convient de noter qu'un amortisseur est une pièce d'usure qui nécessite une surveillance et un entretien régulier. La technologie retenue doit donc faciliter la maintenance.

4.3.2. Gains profilées

Le profilage des gaines permet de combattre efficacement l'excitation pluie + vent. Ce type de solution a été initialement développé au Japon, puis adapté pour le Pont de Normandie, et tend maintenant à se généraliser. Il est possible que le profilage des gaines augmente également l'amortissement aérodynamique des haubans. Il faut toutefois éviter des effets secondaires tels qu'un coefficient de traînée excessif.

Plusieurs approches sont employées :

- Les gaines du pont japonais de Higashi-Kobe sont munies de profondes rainures longitudinales, qui canalisent l'eau descendant le long des haubans, et évitent la vibration du filet d'eau supérieur à l'origine de l'instabilité pluie + vent. Cette solution est efficace mais présente l'inconvénient d'augmenter sensiblement le coefficient de traînée, qui passe de 0,50 à 1,35 environ.

- Une approche différente a été développée au CSTB pour le Pont de Normandie : la gaine comporte un relief en forme de spirale qui désorganise l'écoulement de l'eau. Le modèle retenu, une double spirale de 1,3 mm d'épaisseur et de pas 60 cm, évite l'instabilité pluie + vent sans trop augmenter le coefficient de traînée des haubans (une valeur de 0,62 à 0,63 a été mesurée, contre 0,50 pour une gaine PEHD lisse). Ce modèle, inventé pour le Pont de Normandie sur des gaines de polypropylène en demi-coquilles, est maintenant couramment employé sur des gaines en PEHD.
- Pour le pont de Tatara, un nouveau type de gaine a été développé, avec un réseau de petites cavités distribuées de façon aléatoire sur la surface extérieure, toujours pour désorganiser l'écoulement de l'eau.



Photo 20 : gaine du pont japonais de Higashi-Kobe

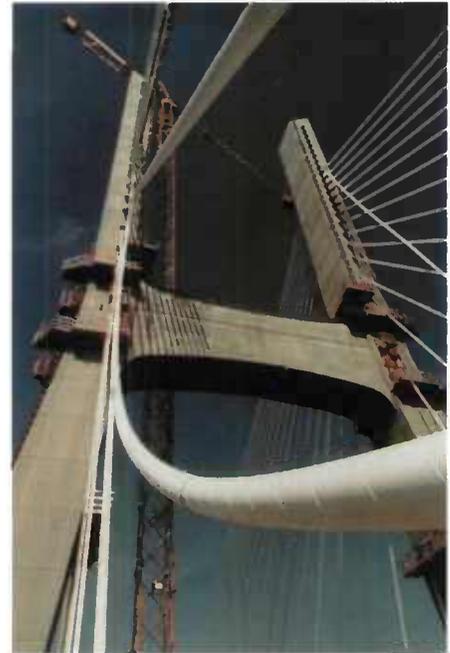


Photo 21 : gaine du pont Vasco de Gama

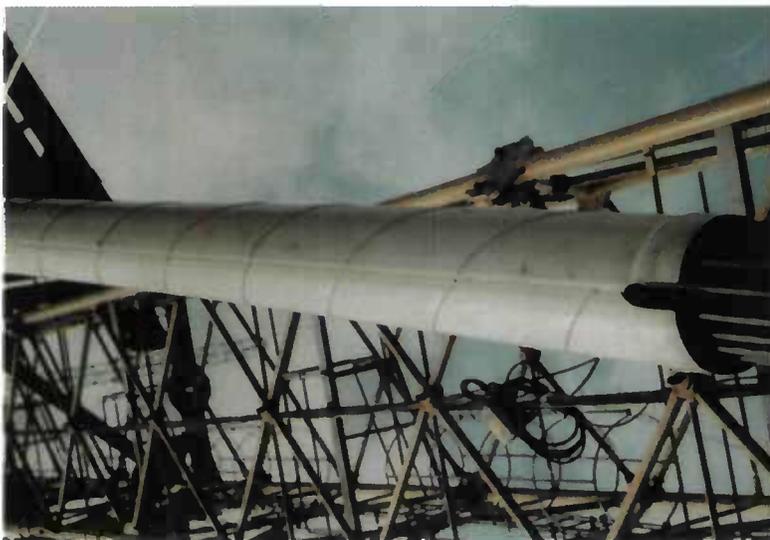


Photo 22 : gaines du pont de Normandie

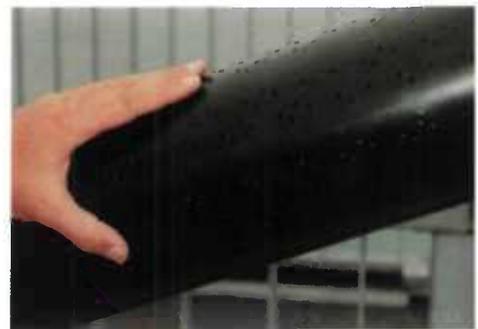


Photo 23 : gaine du pont de Tatara

Il convient enfin de noter que la réduction de la traînée est un point important sur les ponts haubanés de grande portée. En effet, les forces de traînée sur le tablier sont alors réduites par un profilage efficace de la section transversale, et l'action du vent sur la nappe de haubans devient prépondérante. A titre d'exemple, dans le cas du Pont de Normandie, 55 % du moment d'axe vertical dans le tablier, à son encastrement dans les pylônes, provient de la traînée des haubans, et seulement 45 % de l'action du vent sur le tablier.

4.3.3. Aiguilles (câbles d'interconnexion)

La mise en place de câbles d'interconnexion permet d'éviter certaines vibrations de haubans. Ces câbles ont été dénommés "aiguilles" sur le Pont de Normandie, et le terme est maintenant couramment employé.

Ces aiguilles ont été employées pour la première fois sur le Pont de Faro, au Danemark, pour éviter la vibration des longs câbles. Elles ont également été utilisées au Japon, pour éviter des phénomènes de sillage sur les haubans jumelés. Enfin, un système d'aiguille a été utilisé sur le Pont de Normandie, où il avait été calculé que la période fondamentale de vibration des haubans était du même ordre de grandeur que celle des modes de flexion du tablier. L'objectif des aiguilles était alors de modifier fortement les périodes propres des haubans.

Les aiguilles raidissent la nappe de haubans, et peuvent également apporter un amortissement complémentaire, si elles sont conçues à cet effet (cas du Pont de Normandie). Mais elles se révèlent moins efficaces que des amortisseurs pour éviter l'instabilité pluie + vent, sauf si elles apportent elles-mêmes de l'amortissement. En revanche, leur principal intérêt est d'interdire certains modes de vibration verticale des haubans. Ainsi, deux aiguilles placées au tiers et au deux tiers de la portée d'un hauban autoriseront seulement les modes de vibration verticale 3, 6, 9... Les aiguilles sont donc particulièrement adaptées pour éviter certains problèmes de résonance paramétrique ; elles sont toutefois beaucoup moins efficaces sur les modes de vibration transversale.



Photo 24 : les aiguilles du pont de Normandie

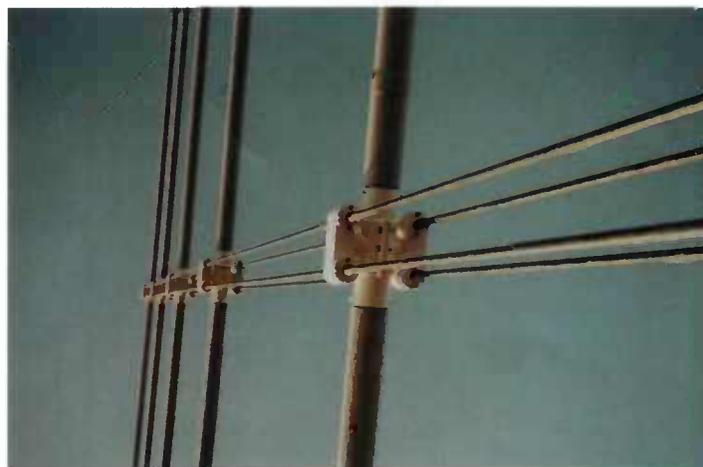


Photo 25 : détail de la liaison hauban / aiguille du pont de Normandie

Il convient de prêter attention aux points suivants lors de la conception d'un système d'aiguilles :

- La section, la rigidité et la tension des aiguilles doivent être déterminées par un calcul d'ensemble de la nappe de haubans interconnectés. La résistance des aiguilles et de leurs ancrages doit être adaptée aux cas de charge extrêmes (trafic, vent turbulent sur l'ouvrage ou sur les haubans).
- La prétension des aiguilles doit permettre d'éviter toute détension sous charge extrême. En effet, une aiguille détendue ne joue plus son rôle et peut subir des chocs néfastes à la durabilité des ancrages. Ainsi, les premiers systèmes mis en place sur le Pont de Faro ou au Japon utilisaient des câbles légers et peu tendus. Plusieurs ruptures ont conduit à les remplacer par des aiguilles plus solides et plus tendues.
- Les cassures angulaires des haubans aux ancrages doivent être évaluées, et éventuellement corrigées.

Des aiguilles ont parfois été utilisées après la mise en service de l'ouvrage, pour corriger des problèmes d'instabilité. Ce fut par exemple le cas pour le Second Pont sur la Severn. Cependant, la mise en place d'aiguilles modifie la géométrie des haubans, avec des conséquences sur la structure et notamment l'apparition de cassures angulaires des haubans aux ancrages. Ces effets secondaires imposent alors des câbles légers et peu tendus, en courant les risques de rupture signalés ci-dessus si l'on n'agit pas simultanément sur l'amortissement des haubans.

ARTICLE 4.4. SPÉCIFICATIONS CONTRE LA VIBRATION DES HAUBANS

La complexité des phénomènes physiques en jeu ne permet pas toujours d'anticiper les risques de vibration des haubans. Inversement, les contraintes économiques empêchent de spécifier des actions correctives superflues. Les règles de conduite suivantes constituent un compromis.

L'instabilité pluie + vent doit systématiquement être prévenue dès la conception, par des gaines de haubans profilées. L'incidence économique de cette mesure préventive est négligeable, et les actions correctives beaucoup plus délicates.

Les risques de vibration augmentent avec la longueur des haubans. Les haubans courts, mesurant moins de 70 à 80 m, ne présentent généralement pas de risque, sauf celui d'une résonance paramétrique en cas d'ouvrage particulièrement instable (tablier mal profilé et souple). Il n'est généralement pas nécessaire de prévoir des amortisseurs pour ces haubans.

Pour les haubans longs, à partir de 80 m, la mise en place d'amortisseurs pour obtenir un décrétement logarithmique supérieur à 3,0 % est recommandée. On peut éventuellement se dispenser d'amortisseur pour les haubans des travées de rives, si celles-ci présentent des portées suffisamment courtes pour empêcher tout déplacement important des ancrages.

Il convient d'anticiper dès la conception le risque de résonance paramétrique par une étude détaillée des modes propres de la structure et des haubans : rapport des pulsations propres et déplacement des ancrages concernés pour chaque mode. On s'efforce d'éviter les chevauchements de pulsation, c'est-à-dire les situations où la pulsation d'excitation Ω est proche de la pulsation propre ω_n ou $2\omega_n$ (à 20 % près). En cas de besoin, on peut utiliser des aiguilles pour décaler la pulsation propre des haubans.

Pour des raisons de confort visuel des usagers, il convient de limiter l'amplitude de vibration des haubans, en s'inspirant du critère suivant proposé par J.C. Foucriat pour le Pont de Normandie : sous un vent modéré, de vitesse 15 m/s (vent quasiment jamais dépassé, avec une certitude de 98,5 % sur le site du Pont de Normandie) l'amplitude de vibration des haubans ne doit pas dépasser 10 centimètres (à 10 % près).

Remarque

Ce n'est pas toujours sur les haubans les plus longs que les amortisseurs sont nécessaires. Ainsi, sur le Pont de Normandie, des amortisseurs externes limitent notamment la vibration transversale des haubans qui pourrait être engendrée par les modes de balancement du tablier.

Le premier mode de balancement est symétrique et présente une amplitude maximale à la clé, là où sont ancrés les haubans les plus longs 45 à 52, mais sa période de 8,24 s est très éloignée de la période fondamentale des haubans.

Le deuxième mode de balancement est antisymétrique et présente une période de 3,09 s, proche de la période fondamentale des haubans 42 à 46. En outre, son amplitude est nulle à la clé, et maximale au niveau du hauban 30. Ce sont donc les haubans 42 à 46 qu'il convient d'amortir en priorité.

En réalité, des amortisseurs externes furent disposés sur les haubans 42 à 52 par précaution [14].

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 5. COMPORTEMENT STATIQUE DES HAUBANS

ARTICLE 5.1. INTRODUCTION

Les haubans se comportent comme des câbles élastiques pesants présentant une rigidité en flexion négligeable en regard de celle du reste de la structure. Leur fonctionnement tient à la fois du ressort (allongement élastique) et de la chaînette classique (effet de grands déplacements).

Suivant la nature du problème, c'est l'un ou l'autre de ces deux aspects qui prédomine. Lorsque l'on s'intéresse à l'effet d'une surcharge sur le tablier d'un pont à haubans, c'est principalement la raideur des haubans qui intervient dans la distribution des efforts dans la structure. En revanche, lorsque l'on cherche à déterminer l'inclinaison à donner aux dispositifs d'ancrage, on assimile naturellement le hauban à une chaînette pour évaluer l'écart angulaire entre la tangente au hauban et sa corde.

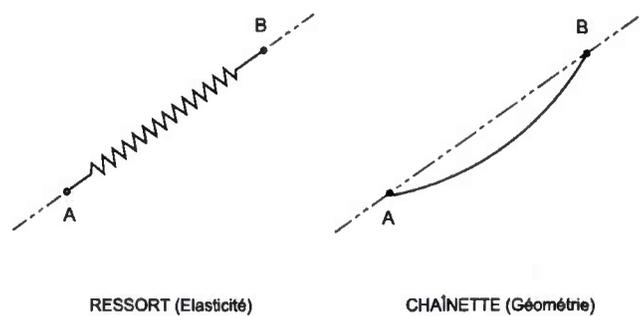


Figure 1 : deux aspects du comportement d'un hauban

Dans la pratique, différentes modélisations peuvent être utilisées pour décrire le comportement mécanique d'un hauban. Ce chapitre rassemble un certain nombre d'informations et de résultats utiles à ce sujet, données que l'on trouve en général de façon dispersée dans la littérature technique ou qui ne sont pas toujours facilement accessibles.

Chaque fois qu'il est apparu nécessaire, l'accent a été volontairement mis sur l'aspect physique des phénomènes, de manière à bien faire appréhender la réalité sous-tendue par les formules proposées et à préciser leur contexte d'application. Enfin, la présentation suit une démarche du modèle le plus simple vers des modèles plus évolués pour aboutir au modèle de chaînette d'un hauban réel.

ARTICLE 5.2. MODÈLE LINÉAIRE D'UN HAUBAN

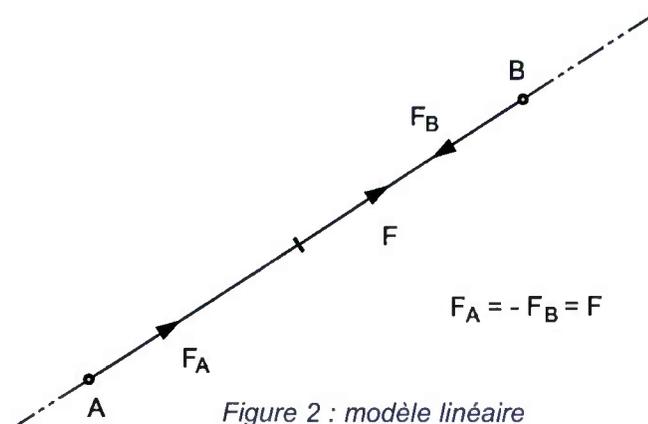


Figure 2 : modèle linéaire

En première approche, un hauban peut être considéré, de façon idéale, comme un élément élastique rectiligne non pesant présentant une rigidité nulle en flexion.

Avec ces hypothèses, la tension F du câble est colinéaire au segment joignant les deux ancrages et son intensité est constante le long du hauban. Les efforts exercés sur les extrémités A et B sont alors deux forces F_A et F_B colinéaires, égales en intensité et de sens opposés, à l'exclusion de tout moment de flexion.

5.2.1. Variation de la tension F

On considère un hauban en place dans une structure. On le suppose non pesant et non chargé latéralement (absence de vent). Sa tension F peut varier au cours du temps, notamment sous l'effet :

- du déplacement des ancrages A et B ;
- de la modification de la température du hauban, les ancrages A et B restant fixés ;
- de la relaxation du matériau constituant le hauban ou de la variation de sa rigidité axiale.

En service, le déplacement des ancrages provient des déformations de la structure sous l'action des charges d'exploitation, des variations de température, du gradient thermique, du retrait et du fluage s'il s'agit d'un ouvrage en béton. Durant les phases de construction, l'évolution du schéma statique (clavages successifs), les charges particulières de chantier, le poids des superstructures et les actions climatiques entraînent des déformations de la partie d'ouvrage déjà construite.

Les haubans présentent en général une faible inertie thermique et sont donc plus sensibles aux conditions climatiques que les parties massives de la structure. Leur température peut donc être assez différente de celle de la structure.

La relaxation est en général négligée dans la pratique, grâce à l'emploi d'armatures stabilisées à très basse relaxation et parce que les contraintes dans le câble restent en deçà du seuil à partir duquel le phénomène se manifeste.

Dans le cas des câbles à torons multi-couches croisées (voir chapitre 9.) le toronage peut également faire varier de façon sensible la tension, par variation de la rigidité axiale liée au tassement transversal des couches successives puis usure aux points de contact. Ce phénomène peut toutefois être limité par un étirage préalable du câble.

5.2.2. Expression de la tension F

Soit F_{ref} la tension dans le hauban pour un état choisi comme état de référence. On désigne par δ_A et δ_B les vecteurs déplacements des ancrages A et B et par $\Delta\theta$ la variation de température du hauban par rapport à cet l'état de référence.

Si l'on suppose le comportement élastique et linéaire, la tension courante F à l'état considéré est donnée par la formule :

$$F = F_{ref} + ES \frac{l - l_{ref}}{l_{ref}} - ES k \Delta\theta \quad (15)$$

avec les notations :

ES rigidité axiale du hauban (produit du module d'Young par la section résistante) ;

k coefficient de dilatation thermique du hauban ;

l_{ref} distance A B dans l'état de référence ;

l distance courante A B dans l'état considéré.

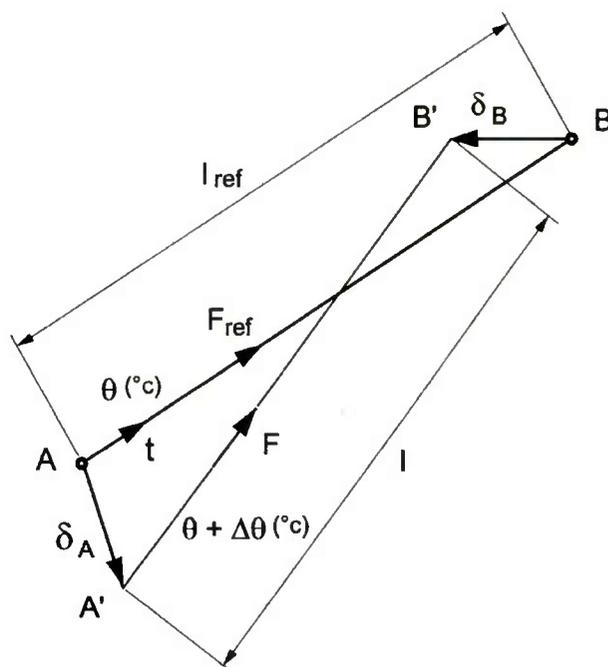


Figure 3 : variation de la tension

A température constante, le hauban se comporte comme un ressort classique de raideur

$$\boxed{K_e = \frac{\Delta F}{\Delta l} = \frac{ES}{l_{ref}}} \quad (16)$$

L'indice e indique que la raideur K_e représente le comportement élastique du hauban. On verra plus loin une seconde raideur correspondant au comportement géométrique.

Dans le cas où les déplacements sont suffisamment petits pour pouvoir négliger les termes du second ordre dans l'évaluation de $l - l_{ref}$ en fonction de δ_A et δ_B , la formule précédente devient :

$$F = F_{ref} + \frac{ES}{l_{ref}} (\delta_B - \delta_A) \cdot t - ES k \Delta \theta \quad (17)$$

dans laquelle t désigne le vecteur unitaire de même direction et de même sens que le vecteur AB (ici, t est multiplié scalairement à $(\delta_B - \delta_A)$).

Si les extrémités du hauban sont assujetties à se déplacer dans un plan vertical Oxz , le produit scalaire $(\delta_B - \delta_A) \cdot t$ peut s'exprimer en fonction de l'angle d'inclinaison α du hauban sur l'horizontale, et F est alors donnée par :

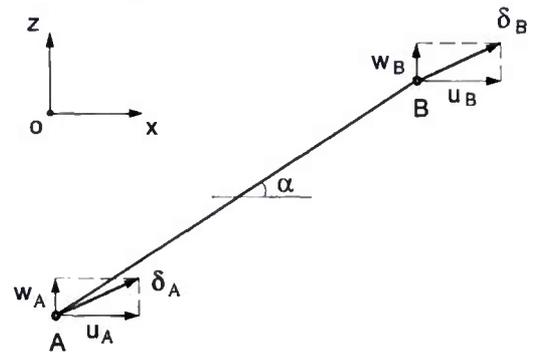


Figure 4

$$F = F_{ref} + \frac{ES}{l_{ref}} [(u_B - u_A) \cos \alpha + (w_B - w_A) \sin \alpha] - ES k \Delta \theta \quad (18)$$

(u_A, w_A) et (u_B, w_B) désignant respectivement les composantes des déplacements δ_A et δ_B dans le système d'axes Oxz .

5.2.3. Utilisation du modèle linéaire de hauban

Le modèle linéaire néglige des phénomènes importants comme l'effet du poids propre des haubans ou la flexion locale du câble au voisinage des ancrages, mais constitue une première étape indispensable pour aborder l'étude du fonctionnement d'un hauban.

De plus, c'est cette modélisation qui est utilisée en pratique par les logiciels de calcul de structures. Ceux-ci sont destinés à modéliser le comportement d'ouvrages construits phase par phase et procèdent le plus souvent par cumul des effets de chacune des opérations élémentaires effectuées sur la structure. Il s'agit là bien sûr d'une approche par essence linéaire.

Dans ces programmes, les haubans sont modélisés sous forme de barres articulées à leurs deux extrémités. A quelques variantes près de la méthode, l'activation d'un hauban s'effectue ainsi :

- On applique en A et B, avant insertion du hauban dans la structure, deux forces F_A et F_B colinéaires, de sens opposés, et d'intensité égale à la force de mise en tension F (préchargement de la structure initiale).
- On assemble ensuite la barre correspondant au hauban, en modifiant la matrice de rigidité de la structure. La barre présente alors une tension initiale F .
- Au fur et à mesure du chargement de la structure, la tension dans la barre évolue à partir de cet état, pris comme état de référence, conformément à l'équation (15).

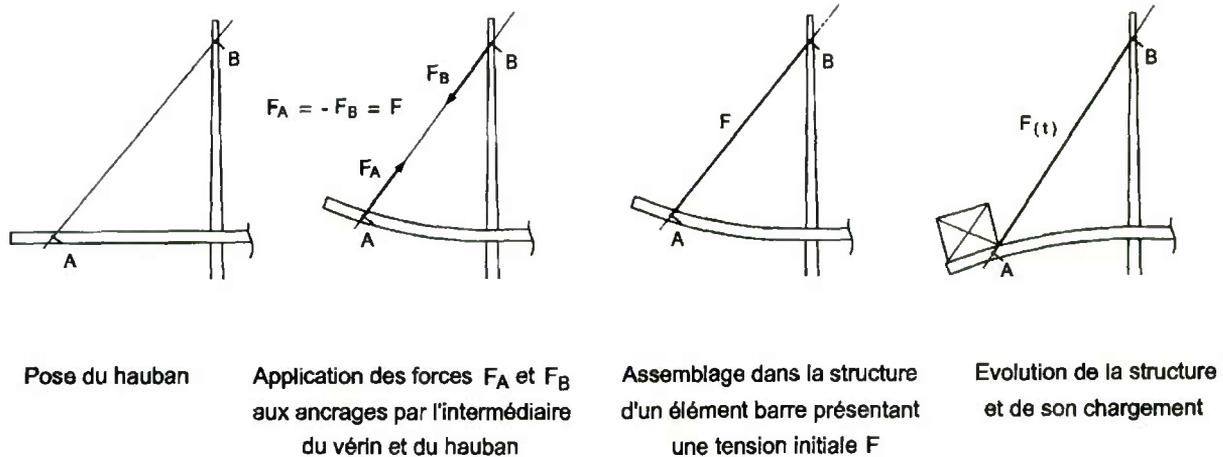


Figure 5 : modélisation de l'installation d'un hauban dans un programme

ARTICLE 5.3. EFFET APPROCHÉ DU POIDS PROPRE D'UN HAUBAN

Un hauban pesant souvent plusieurs tonnes (voire dizaines de tonnes), l'effet de son poids propre ne peut pas être complètement négligé. La prise en compte du poids du hauban permet de modéliser son comportement de manière plus fine, ce qui conduit à des résultats s'écartant sensiblement de ceux du modèle linéaire précédent.

En particulier :

- la tension F n'est plus constante le long du hauban ;
- les efforts aux ancrages ne sont plus dirigés suivant la corde AB ;
- le profil du hauban se situe entièrement sous la corde, avec une flèche f et sa longueur en place est plus grande que la distance AB ;
- le déplacement des ancrages produit à la fois une déformation élastique du câble et une modification de la géométrie du profil avec variation de la flèche. La relation entre tension et déplacement n'est donc plus linéaire.

5.3.1. Implications pratiques du poids propre

Il faut préciser à quel ancrage (haut ou bas) s'applique une tension donnée, si l'on ne veut pas commettre une erreur systématique de quelques pour cents, surtout lors de phases intermédiaires de construction, lorsque les haubans ne sont que partiellement tendus.

On doit implanter l'axe des dispositifs d'ancrage, sur le pylône et sur le tablier d'un pont à haubans, non pas suivant la corde AB , mais suivant la tangente au profil.

Même avant sa mise en tension, avec un vérin ou par tout autre moyen adapté, le hauban exerce déjà un effort sur la structure, du fait de son poids propre. On ne peut donc pas parler de hauban "sans tension initiale".

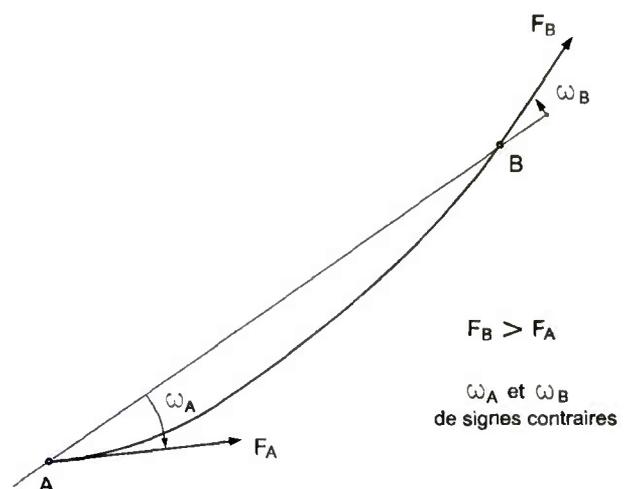


Figure 6 : effets du poids propre

5.3.2. Variation de la tension le long du hauban

Le hauban étant supposé parfaitement flexible, les efforts internes dans la section courante d'abscisse curviligne s se réduisent à une tension F dirigée suivant la tangente en s au profil. Comme la pesanteur est une action verticale, et en l'absence de chargement latéral, la composante horizontale H de la tension F demeure constante sur toute la longueur du hauban, tandis que la composante verticale V varie.

Plus précisément, les équations d'équilibre suivant les directions horizontale et verticale du tronçon de câble d'origine A et de longueur s permettent d'exprimer H et V en fonction de s :

$$\begin{cases} H(s) = H_A = H \\ V(s) = V_A + qs \end{cases} \quad (19)$$

q désignant le poids linéique du hauban en place, supposé constant, et s l'abscisse curviligne du point considéré mesuré à partir de A .

La pente de la tangente au point courant du profil est simplement le rapport $\frac{V(s)}{H(s)}$, car la tension $F(s)$ est colinéaire à la tangente.

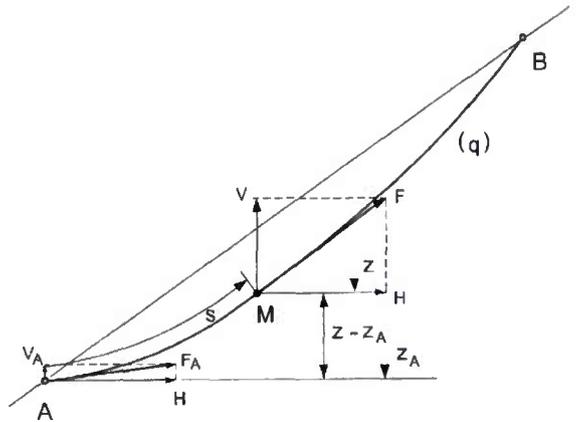


Figure 7 : tension le long du hauban

La valeur de la tension courante F en s s'obtient par simple application du théorème de Pythagore :

$$F^2(s) = H^2 + V^2(s) \quad (20)$$

On peut par ailleurs démontrer la formule suivante :

$$F(s) = F_A + q(z - z_A) \quad (21)$$

où z désigne la cote du point courant. L'équation (21) exprime la propriété remarquable suivante : la différence de tension entre les ancrages haut et bas est égale au poids linéique du hauban multiplié par la distance verticale entre ces ancrages.

Exemple numérique

On considère un hauban 73 T15, de longueur horizontale égale à 200 m, fixé sur deux ancrages distants verticalement de 100 m. Le poids linéique du hauban est égal à 1 kN/m, tandis que sa tension mesurée à l'ancrage bas vaut 6000 kN.

La tension à l'ancrage haut vaut alors $6000 + 1 \times 100 = 6100$ kN.

L'écart relatif de la valeur de la tension entre les ancrages bas et haut est donc de 1,6 %, pour un poids de hauban représentant 3,7 % de la tension.

5.3.3. Prise en compte du poids propre dans un modèle linéaire

Dans l'analyse d'une structure haubanée à l'aide d'un modèle linéaire, on peut prendre en compte de façon approchée l'effet du poids propre. Pour cela, on utilise dans la pratique :

- un élément de barre non pesante, ne résistant qu'aux efforts axiaux avec une rigidité axiale ES (modèle linéaire de la section précédente) ;
- complété par l'action sur la structure du poids propre réparti P du hauban ; celle-ci est introduite sous forme de deux charges concentrées verticales d'intensité $P/2$ appliquées aux deux extrémités de l'élément.

Les résultats obtenus par cette méthode ne sont qu'approchés.

En particulier, la relation $F_B - F_A = q(z_B - z_A)$ donnant la différence de tension entre ancrages n'est théoriquement plus vérifiée du fait de la présence d'efforts tranchants dans un élément rigide pesant. Cependant, la formule (21) reste en pratique vérifiée avec une très bonne précision par le modèle approché. En effet, la tension appliquée par le hauban sur les ancrages vaut alors :

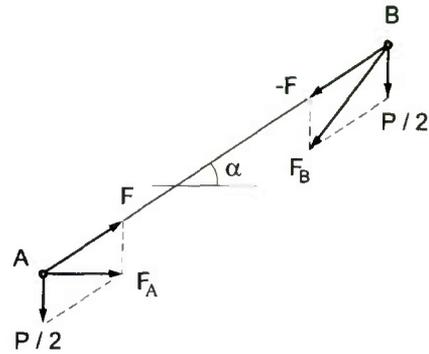


Figure 8 : prise en compte approchée du poids propre d'un hauban

$$F_A = \sqrt{(F \cos \alpha)^2 + (F \sin \alpha - \frac{P}{2})^2}$$

$$F_B = \sqrt{(F \cos \alpha)^2 + (F \sin \alpha + \frac{P}{2})^2}$$
(22)

Si P demeure petit devant F, on peut évaluer $(F_B - F_A)$ à l'aide d'un développement limité. On obtient alors, au troisième ordre près en (P/F) :

$$F_B - F_A \approx F \left(\frac{P}{F} \sin \alpha + \dots \right)$$
(23)

ce qui s'écrit encore :

$$F_B - F_A = q(z_B - z_A)$$
(24)

Enfin, il n'est pas inutile de signaler que la modélisation d'un hauban par une barre biarticulée ne convient que pour un câble tendu. Les résultats seraient erronés si les chargements de la structure postérieurs à l'introduction du hauban détendaient celui-ci. Seule, une modélisation de type chaînette peut résoudre de tels problèmes.

5.3.4. Point I de flèche maximale

On évalue l'écart entre le profil du hauban et sa corde en considérant communément la distance verticale f entre chaque point M du profil et la corde AB, ou alternativement, la distance f_t de M à AB mesurée suivant la perpendiculaire à AB. Ces deux flèches sont liées par la relation :

$$f_t = f \cos \alpha$$
(25)

α désignant l'angle de la corde par rapport à l'horizontale.

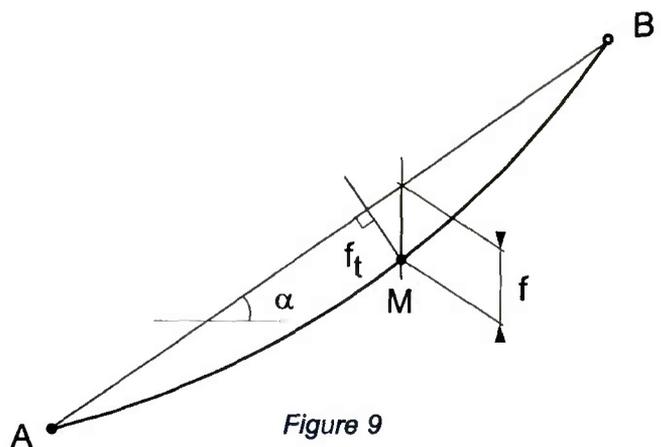


Figure 9

Les maxima des deux flèches ont donc lieu pour le même point du profil, que l'on désigne par la lettre I. Le vecteur unitaire t_t tangent en I au profil est parallèle à la corde AB. En effet, I est le point où la fonction $f_t(s)$ prend son maximum, donc a une dérivée nulle. Le point I est remarquable à plusieurs titres, et permet de formuler des propriétés ou des formules approchées intéressantes.

5.3.5. Tension exacte F suivant la corde

Comme déjà indiqué, le fait que le hauban soit supposé parfaitement flexible entraîne que la tension est en tout point tangente au profil du câble. Cette propriété est en particulier valable au point I, où la tension F_I est donc parallèle à la corde AB. La tension en I fournit une interprétation physique intéressante de l'action exercée par le hauban sur les ancrages, comme on va le préciser ci-après.

On désigne par k le vecteur unitaire vertical dirigé vers le haut et par P_{IA} et P_{IB} le poids des tronçons de câble respectivement compris entre les points I et A d'une part et I et B d'autre part.

Les conditions d'équilibre horizontal et vertical des forces appliquées à chacun de ces tronçons IA et IB permettent d'évaluer les efforts F_A et F_B exercés par le hauban sur ses extrémités :

$$\begin{aligned} F_A &= F_I - P_{IA} k \\ F_B &= -F_I - P_{IB} k \end{aligned} \quad (26)$$

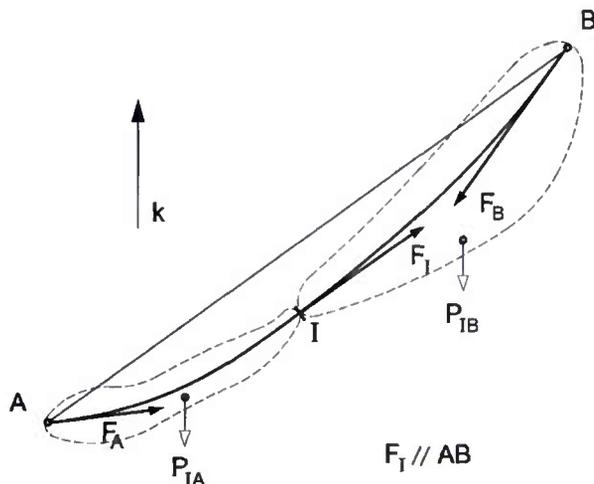


Figure 10 : poids des tronçons de câble IA et IB

L'action du hauban sur chaque ancrage revient donc à appliquer en ce point :

- d'une part, une force d'intensité F_I portée par la corde AB comme si le hauban n'était pas pesant ;
- d'autre part, une force verticale descendante égale au poids du tronçon de hauban joignant l'ancrage considéré au point I.

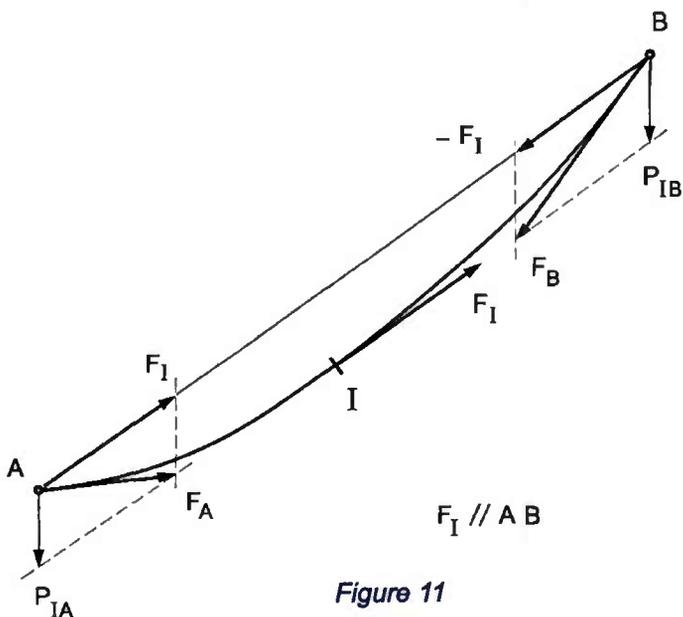


Figure 11

Tout se passe donc comme si le hauban était un élément pesant dont le poids total P était repris sous forme de réactions verticales par les deux ancrages A et B, et exerçait par ailleurs sur A et B deux forces opposées, d'intensité égale à F_I , portées par la corde AB. Compte tenu de cette interprétation physique, la tension d'un hauban pesant est souvent caractérisée par F_I , alors baptisée "tension suivant la corde" et simplement notée F . Il est à noter qu'aucune hypothèse simplificatrice n'a été formulée pour énoncer ce résultat, qui est donc exact.

La position du point I sur le profil contrôle la répartition du poids du hauban entre les deux ancrages. Si le hauban est suffisamment tendu, le point I se situe approximativement au milieu du hauban et l'on peut donc admettre dans ce cas que chacun des ancrages reprend $P/2$. Ce résultat justifie les errements classiques de la section 5.3.3. et fournit des formules approchées utiles. Plus précisément, on verra par la suite qu'en distance horizontale le point I est toujours légèrement plus proche de l'ancrage B que de l'ancrage A, alors que si l'on mesure cette distance le long du hauban, I est en général plus près de A que de B.

5.3.6. Expression approchée de la flèche

On se place dans l'hypothèse où I peut être assimilé au milieu du profil AB (le poids propre du hauban se répartit également entre les deux ancrages) et la flèche maximale f_{max} est suffisamment petite pour que la longueur développée du hauban puisse être considérée comme peu différente de celle de la corde l.

On obtient alors l'expression de la flèche verticale maximale f_{max} en écrivant l'équilibre en moment par rapport à A du tronçon IA :

$$F \times f_{max} \cos \alpha = q \frac{l}{2} \times \frac{l \cos \alpha}{4} \quad (27)$$

d'où finalement :

$$f_{max} = \frac{ql^2}{8F} \quad (28)$$

La formule classique relative à un câble horizontal reste donc encore valable pour un hauban incliné, pourvu que l'on considère la flèche verticale et que l'on prenne en compte la longueur de la corde.

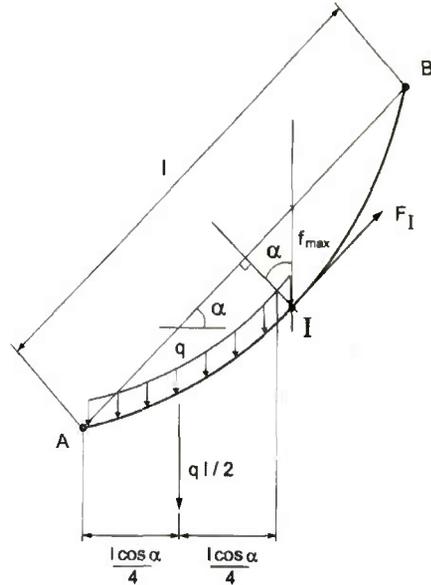


Figure 12 : flèche quand I est à mi-portée

5.3.7. Déviation angulaire aux ancrages

On note ω_A et ω_B la déviation angulaire entre les tangentes aux extrémités A et B et la corde AB. Ces angles sont en général petits devant α et, avec les conventions de la figure 13 ci-dessous, ω_A est négatif et ω_B positif.

La pente de la tangente en B au profil du hauban vaut $\tan(\alpha + \omega_B)$. On peut aussi l'exprimer en fonction des composantes de l'effort en B :

$$\tan(\alpha + \omega_B) = \frac{V_B}{H_B} = \frac{V_I + \frac{ql}{2}}{H_I} \quad (29)$$

Cette expression s'écrit encore :

$$\tan(\alpha + \omega_B) = \frac{V_I}{H_I} + \frac{ql}{2H} = \tan \alpha + \frac{ql}{2H} \quad (30)$$

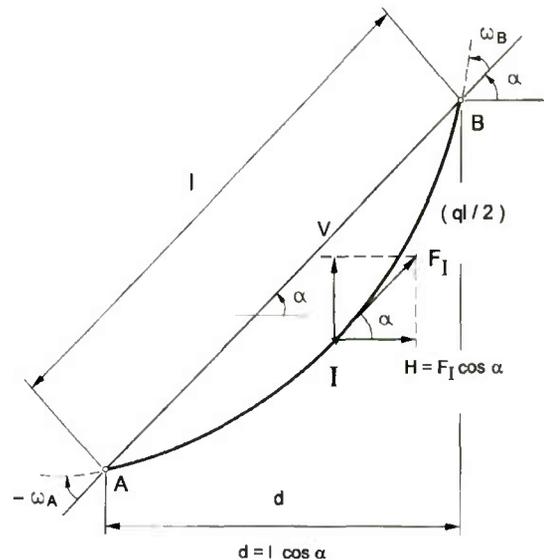
En effectuant un développement limité de $\tan(\alpha + \omega_B)$ au premier ordre en ω_B , et en identifiant les termes membre à membre, on trouve :

$$\omega_B = \frac{ql \cos^2 \alpha}{2H} \quad (31)$$

On pourrait faire les mêmes manipulations en A, pour trouver que, dans notre approximation, ω_A et ω_B ont la même valeur absolue, que l'on note ω :

$$\omega = \frac{qd}{2F}$$

(32) Figure 13 : déviations angulaires aux ancrages



où d désigne la distance horizontale entre les deux ancrages et ω est exprimé en radians.

Exemple numérique

On reprend le cas du hauban 73 T15 traité dans la section 5.3.2. En supposant que la tension suivant la corde vaut 6000 kN, l'application directe des formules donne :

$$f_{max} = 1 \times (200^2 + 100^2) / 8 / 6000 = 1,042 \text{ m}$$

$$\omega = 1 \times 200 / 2 / 6000 = 0,01667 \text{ rad} = 0,9549 \text{ deg}$$

La valeur de ω est importante pour l'implantation des dispositifs d'ancrage. On verra plus loin la qualité de cette approximation.

ARTICLE 5.4. MODÈLE DE LA CHÂINETTE

La modélisation fine d'une corde pesante de poids linéique uniforme est bien connue sous le nom de chaînette. Le profil d'un hauban tendu entre ses deux ancrages est ainsi naturellement assimilable à une chaînette.

D'un point de vue strictement théorique, le poids linéique q d'un hauban en place n'est pas tout à fait uniforme, puisque sa tension varie avec l'altitude et que le câble présente donc une certaine variation de section, due à une variation d'allongement. Cet effet est cependant tout à fait négligeable, et l'on peut utiliser directement les formules analytiques classiques pour évaluer de façon rigoureuse les caractéristiques du profil : flèche maximale, inclinaison des tangentes aux extrémités, longueur développée, etc.

Outre la validation des formules approchées déjà présentées, le modèle de la chaînette permet surtout d'apprécier l'effet des grands déplacements sur la rigidité axiale effective d'un hauban.

5.4.1. Rappel des formules classiques de la chaînette

On utilise les notations suivantes :

- q poids linéique du câble en place ;
- d distance horizontale entre ancrages ;
- h distance verticale entre ancrages ;
- F tension du câble au point I de flèche maximale, ou tension suivant la corde ;
- L longueur développée de la chaînette ;

$$l = \sqrt{d^2 + h^2} \quad \text{longueur de la corde ;}$$

- F_M vecteur tension au point courant M ;
- H composante horizontale de F_M (constante le long du profil) ;
- V_M composante verticale de F_M au point courant M.

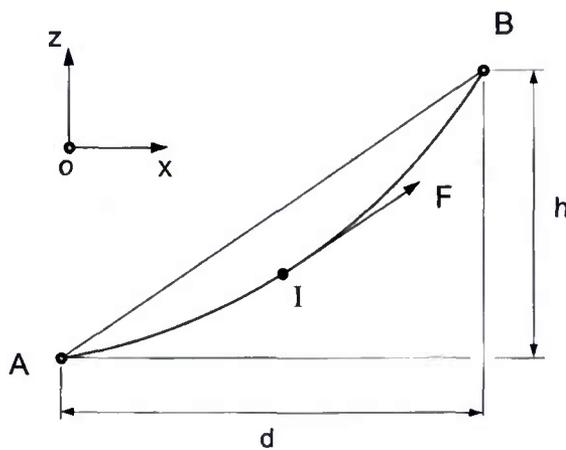


Figure 14

Le poids linéique q du câble en place est, en toute rigueur, légèrement inférieur au poids linéique q_0 du câble non tendu. En écrivant la conservation de la masse du câble $qL = q_0l_0$, où l_0 est la longueur du câble non tendu, on peut déduire l'expression de q par la formule :

$$q = \frac{q_0}{1 + \frac{F}{ES}} \approx q_0 - \frac{q_0 \sigma}{E} \tag{33}$$

Pour les applications courantes σ , la contrainte axiale dans le câble, est de l'ordre de 700 MPa et q est égal à q_0 à 0,5 % près.

On se place dans le repère Oxz , d'origine O confondue avec l'ancrage bas A . Le point courant $M(x, z)$ a pour abscisse curviligne s . La forme du profil est alors donnée par :

$$\begin{aligned} z(x) &= \frac{H}{q} \left[\cosh \left(\frac{qx}{H} + K \right) - \cosh K \right] \\ s(x) &= \frac{H}{q} \left[\sinh \left(\frac{qx}{H} + K \right) - \sinh K \right] \end{aligned} \quad (34)$$

où K est une constante d'intégration définie par :

$$K = \sinh^{-1} \left(\frac{\frac{qh}{2H}}{\sinh \left(\frac{qd}{2H} \right)} \right) - \frac{qd}{2H} \quad (35)$$

Composantes de la tension courante F_M :

$$\begin{aligned} H &= F \cos \alpha = F \frac{d}{l} \\ V_M(x) &= H \frac{dz}{dx} = H \sinh \left(\frac{qx}{H} + K \right) \\ F_M(x) &= H \cosh \left(\frac{qx}{H} + K \right) \end{aligned} \quad (36)$$

Position du point I de flèche maximale :

$$x_I = \frac{d}{2} + \frac{H}{q} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{h}{d} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{\frac{qh}{2H}}{\sinh \left(\frac{qd}{2H} \right)} \right) \right] \quad (37)$$

Longueur du câble tendu entre A et B :

$$L = s(d) \quad (38)$$

Ou encore, par la "formule de Pythagore pour une chaînette" :

$$L^2 = d^2 f^2(u) + h^2 \quad (39)$$

avec $f(u) = \frac{\sinh(u)}{u}$ et $u = \frac{qd}{2H}$

Tension à l'ancrage bas A :

$$\begin{aligned} V_A &= H \sinh K \\ F_A &= \sqrt{H^2 + V_A^2} \end{aligned} \quad (40)$$

Tension à l'ancrage haut B :

$$\begin{aligned} V_B &= V_A + qL \\ F_B &= \sqrt{H^2 + V_B^2} \end{aligned} \quad (41)$$

Inclinaison du profil et angles de déviation aux ancrages :

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \frac{h}{d} \\ \omega_A &= \tan^{-1} \frac{V_A}{H} - \alpha \\ \omega_B &= \tan^{-1} \frac{V_B}{H} - \alpha \end{aligned} \quad (42)$$

5.4.2. Point I de flèche maximum

L'expression de l'abscisse x_1 permet de calculer le décalage horizontal δ entre le point I et le milieu de la corde AB.

$$x_1 - \frac{d}{2} = \delta = \frac{H}{q} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{h}{d} \right) - \sinh^{-1} \frac{\frac{qh}{2H}}{\sinh \left(\frac{qd}{2H} \right)} \right] \quad (43)$$

Un développement limité de cette expression conduit à une formule approchée extrêmement simple du décalage δ :

$$\boxed{\delta = \frac{qdh}{24F}} \quad (44)$$

On constate que la valeur du décalage diminue avec la tension F . L'existence d'un décalage δ entraîne que le point I de flèche maximale ne se trouve pas à mi-portée de AB, contrairement à ce que l'on avait admis en première approximation au paragraphe 5.3.6. Les écarts angulaires ω_A et ω_B aux extrémités sont donc différents en valeur absolue.

La formule (44) joue un rôle important dans l'étude du comportement mécanique d'un hauban, car elle permet d'établir des formules utiles, à la fois simples et très précises.

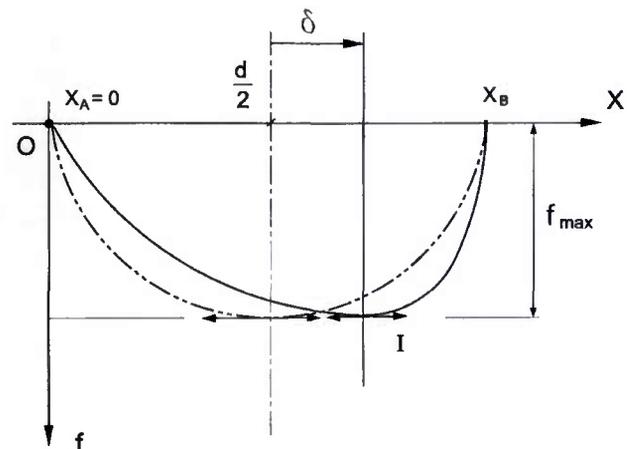


Figure 15 : écart entre profil parabolique et profil réel du hauban

5.4.3. Formules approchées utiles

5.4.3.1. Tension aux ancrages

La distance verticale h_I entre l'ancrage bas A et le point de flèche maximum I vaut :

$$h_I = \frac{h}{2} + \delta \frac{h}{d} - f_{\max} \quad (45)$$

En remplaçant δ et f_{\max} par leur valeur, on trouve :

$$h_I = \frac{h}{2} - \frac{q(3d^2 + 2h^2)}{24F} \quad (46)$$

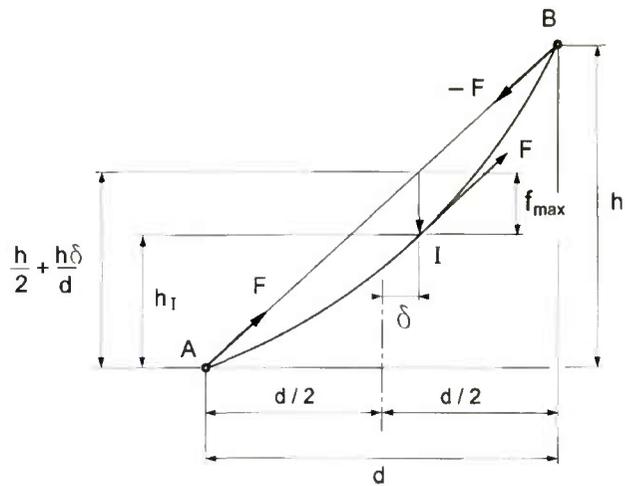


Figure 16

Or la différence de tension entre deux points d'un câble est égale au produit du poids linéique du câble par la distance verticale entre ces deux points. On en tire les expressions :

$$\begin{aligned} F_A &= F - \frac{qh}{2} + \frac{q^2(3d^2 + 2h^2)}{24F} \\ F_B &= F + \frac{qh}{2} + \frac{q^2(3d^2 + 2h^2)}{24F} \end{aligned} \quad (47)$$

5.4.3.2. Répartition du poids du hauban entre les ancrages

On a vu à la section 5.3.5. que la répartition du poids d'un hauban entre ses ancrages dépendait de la position du point I sur son profil. On démontre les formules suivantes, donnant les parts P_{IA} et P_{IB} du poids P du hauban repris par A et B :

$$\begin{aligned} P_{IA} &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{qh}{6F} \right) P \\ P_{IB} &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{qh}{6F} \right) P \end{aligned} \quad (48)$$

De l'expression de P_{IA} on tire directement l'abscisse curviligne du point I sur le profil :

$$s_I = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{qh}{6F} \right) L \quad (49)$$

Le point I est donc plus proche du point A que du point B, si l'on considère les distances mesurées le long du profil (alors qu'il se trouve du côté de B en projection horizontale).

5.4.3.3. Inclinaison sur l'horizontale des tangentes aux extrémités

Après quelques manipulations mathématiques utilisant l'expression de V_A , on obtient les valeurs des inclinaisons θ_A et θ_B des tangentes aux extrémités A et B sur l'horizontale :

$$\begin{aligned} \tan \theta_A &= \frac{h}{d} \left[1 - \frac{q(d^2 + h^2)}{2hF} \left(1 - \frac{qh}{6F} \right) \right] \\ \tan \theta_B &= \frac{h}{d} \left[1 + \frac{q(d^2 + h^2)}{2hF} \left(1 + \frac{qh}{6F} \right) \right] \end{aligned} \quad (50)$$

Pour des haubans de portées inférieures à 500 m, les termes en $1/F$ introduisent des corrections inférieures à 1% dans les formules donnant F_A , F_B , P_{IA} , et P_{IB} . Ils peuvent donc être négligés dans la pratique. En revanche, ces termes demeurent importants pour le calcul des pentes des tangentes aux extrémités.

5.4.4. Exemple numérique

On reprend le cas du hauban 73 T15 traité dans la section 5.3.2. On suppose que la tension suivant la corde vaut $F = 6000$ kN. Le tableau ci-dessous compare les résultats des formules approchées données dans les sections précédentes à ceux des formules exactes de la chaînette.

	Approximation I milieu de AB (Section 5.3.6.)	Approximation I décalé de δ (Section 5.4.3.)	Formules exactes de chaînette (Section 5.4.1.)
décalage δ (m)	0,00000	0,13889	0,13888
f_{\max} (m)	1,04167	1,04167	1,04169
F_A (kN)	5950,84	5950,97	5950,97
F_B (kN)	6050,83	6050,97	6050,97
ω_A (deg)	-0,95493	-0,96017	-0,96021
ω_B (deg)	0,95493	0,94956	0,94960

Cet exemple numérique montre l'excellence des formules approchées.

La longueur de la corde AB est $l = 223,607$ m et la longueur développée $L = 223,617$ m. Une surlongueur de 10 millimètres seulement génère une flèche de plus d'un mètre.

ARTICLE 5.5. MODÈLE DU CÂBLE PESANT INEXTENSIBLE

L'étude du cas limite d'un câble dépourvu d'élasticité (câble inextensible) permet d'isoler dans le comportement réel d'un hauban les effets de grands déplacements, c'est-à-dire les effets de la modification de la géométrie du profil.

Dans cette section, on s'intéresse donc à un câble inextensible de poids linéique q dont on fait varier la tension F suivant la corde.

5.5.1. Expression de la longueur développée L

La formule (38) permet d'exprimer la longueur développée L de la chaînette en fonction de la tension horizontale H , et donc de la tension F selon la corde grâce à l'équation (36) Malheureusement, la forme de ces équations ne permet pas d'obtenir une expression analytique simple décrivant par exemple la dépendance de L avec la flèche f_{\max} .

D'où l'idée d'établir une formule approchée basée uniquement sur des considérations de géométrie analytique. En tout point du câble d'abscisse x , la cote z s'exprime en fonction de la flèche verticale $f(x)$ par

$$z = \frac{h}{d} x - f(x) \quad (51)$$

Lorsque la flèche du câble reste petite, la longueur développée du câble L est donnée par un développement limité, au troisième ordre près en $f'(x)$:

$$L = \int_0^d \sqrt{1 + [z'(x)]^2} dx \approx l + \frac{d^3}{2l^3} \int_0^d [f'(x)]^2 dx \quad (52)$$

Cette relation très générale est valable pour tout profil dont la dérivée de la flèche reste petite devant l'unité.

La flèche $f(x)$ est a priori une fonction vérifiant $f(0) = f(d) = 0$ et prenant son maximum au point I d'abscisse $(d/2 + \delta)$. En toute rigueur, la déformée en chaînette devrait donc être approchée par une cubique (non symétrique). Cependant, si l'on suppose que l'abscisse de I est proche de $d/2$, la flèche $f(x)$ peut être assimilée à un arc de parabole symétrique :

$$f(x) = \frac{4f_{\max}}{d^2} x(d-x) \quad (53)$$

En remplaçant f par l'expression (53) dans l'équation (52) on obtient une très bonne expression approchée de la longueur développée du câble :

$$L = l + \frac{8d^2 f_{\max}^2}{3l^3} \quad (54)$$

Exemple numérique

On reprend le cas du hauban 73 T15 traité dans la section 5.3.2.

La longueur développée L exacte donnée par la formule (38) vaut 223,6172 m.

L'approximation ci-dessus donne la valeur 223,6174 m soit une précision relative de 10^{-6} .

Le fait que l'approximation par une parabole donne de si bons résultats s'explique par l'analogie du câble (arc tendu) avec une poutre sous-tendant le câble. On sait que la déformée du câble est alors affine à la courbe de moment fléchissant dans cette poutre soumise aux mêmes charges que le câble. Pour un câble uniformément chargé en projection horizontale, cette courbe est la parabole bien connue. Une approximation de $f(x)$ par une sinusoïde donnerait de moins bons résultats.

5.5.2. Réponse de la flèche en fonction de la longueur entre ancrages

Lors de la mise en tension ou du réglage d'un hauban inextensible, l'augmentation de tension résulte :

- soit du raccourcissement de la longueur développée L du câble, la position des ancrages restant inchangée (cas de la mise en tension d'un hauban multi-torons à clavettes) ;
- soit du déplacement des ancrages que l'on éloigne en maintenant constante la longueur développée du câble (cas de la mise en tension d'un hauban par interposition de cales entre l'ancre et la structure).

Dans les deux cas, c'est l'écart $e = L - l$ que l'on fait varier. L'équation (54) permet d'exprimer la flèche en fonction de cet écart e :

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{3l^3}{8d^2}} e \quad (55)$$

et, par dérivation, l'évolution de la flèche lors d'une variation marginale de longueur Δe du hauban par rapport à sa corde :

$$\Delta f_{\max} = \frac{f_{\max}}{2e} \Delta e \quad (56)$$

Le facteur $\frac{f_{\max}}{2e}$ apparaît comme un coefficient d'amplification. Le comportement d'un câble

inextensible présente la caractéristique remarquable suivante : lorsque l'écart e est petit, une faible variation Δe induit une forte variation Δf_{\max} de la flèche.

Exemple numérique

On reprend le cas du hauban 73 T15 traité dans la section 5.3.2. Sous une tension de 6000 kN, le profil présente une flèche maximale $f_{max} = 1,04$ m.

L'écart e entre la longueur développée et la corde donné la formule (54) vaut 0.010 m.

Le coefficient d'amplification vaut alors 50 : une variation d'un millimètre de e produirait une variation de la corde de 50 mm environ.

5.5.3. Réponse de la tension en fonction de la longueur entre ancrages

En combinant la formule (54) de la longueur développée en fonction de f_{max} , d'une part, et l'expression approchée (28) de la flèche en fonction de F , d'autre part, on obtient :

$$L = l + \frac{q^2 d^2 l}{24F^2} \tag{ 57 }$$

Cette formule permet d'exprimer la variation de la longueur d'un hauban inextensible (variation de la corde à longueur développée L fixée, ou bien variation de la longueur de câble entre ancrages à corde l fixée) lors d'une variation marginale de sa tension de F_0 à F . Par exemple, à longueur développée L fixée :

$$\frac{\Delta L}{l} = \frac{q^2 d^2}{24} \left(\frac{1}{F_0^2} - \frac{1}{F^2} \right) \tag{ 58 }$$

Comme on le voit, lorsque l'on fait évoluer la tension F à partir d'une valeur initiale F_0 , la réponse en déplacement Δl n'est pas linéaire, mais varie en $-1/F^2$. Si l'on se limite à des valeurs de F voisines de F_0 , on peut linéariser la variation $\Delta F = F - F_0$ en fonction de Δl :

$$\Delta F = K_g \Delta l \tag{ 59 }$$

avec :

$$K_g = \frac{12F^3}{q^2 d^2 l} \tag{ 60 }$$

On fait ainsi apparaître la raideur K_g qui caractérise le comportement géométrique linéarisé du hauban inextensible.

ARTICLE 5.6. MODÉLISATION D'UN HAUBAN RÉEL

Les différents résultats établis précédemment peuvent être rassemblés pour décrire un hauban réel par un modèle simple, pouvant être utilisé dans un programme de calcul linéaire.

5.6.1. Ressort équivalent à un hauban réel

Lorsqu'il est soumis à une variation ΔF de sa tension suivant la corde, un hauban s'allonge, d'une part, du fait de l'élasticité de son matériau constitutif, et d'autre part, du fait de la variation de sa géométrie. Tout se passe comme si l'on plaçait en série deux ressorts de raideurs respectives K_e donnée par la formule (16) et K_g donné par la formule (60).

En écrivant que l'allongement total est la somme de ces deux allongements, il vient :

$$\Delta l = \frac{\Delta F}{K_e} + \frac{\Delta F}{K_g} = \frac{l}{ES} \Delta F + \frac{q^2 d^2 l}{12F^3} \Delta F = \frac{l}{E^* S} \Delta F \tag{ 61 }$$

en posant

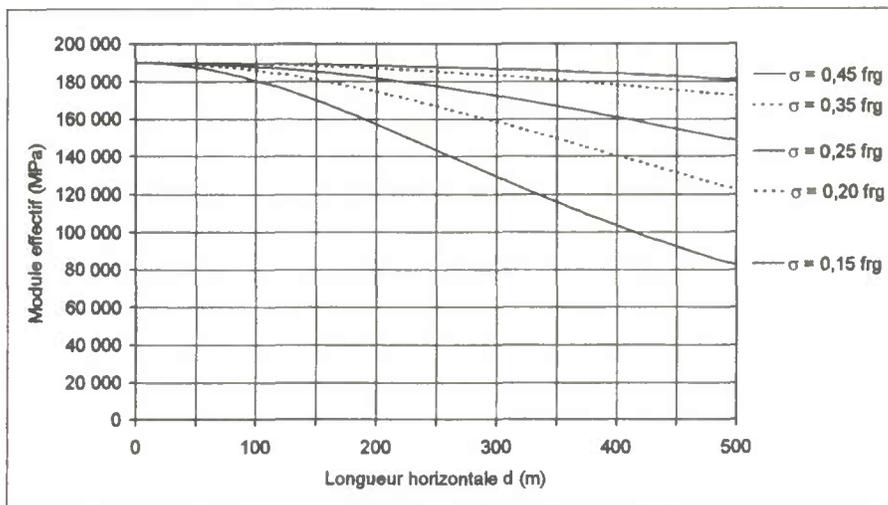
$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E} + \frac{q^2 d^2 S}{12F^3} \tag{ 62 }$$

En introduisant le poids volumique $\rho = q/S$ du matériau et la contrainte axiale du câble $\sigma = F/S$, on retrouve l'expression classique de la formule, due à H.J. Ernst, du module réduit d'un hauban :

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E} + \frac{\rho^2 d^2}{12\sigma^3} \tag{ 63 }$$

5.6.2. Module apparent et raideur d'un hauban

Le graphique 1 ci-dessous donne la valeur du module effectif E^* d'un hauban en fonction de sa portée horizontale d grâce à la formule (63) pour différentes valeurs du taux de travail (classe $f_{rg} = 1770$ MPa). Il en ressort que le module chute quand la portée du hauban augmente, et cela d'autant plus vite que le taux de travail du hauban est faible. En effet, l'influence de la géométrie dans le module apparent du hauban varie comme $1/\sigma^3$.



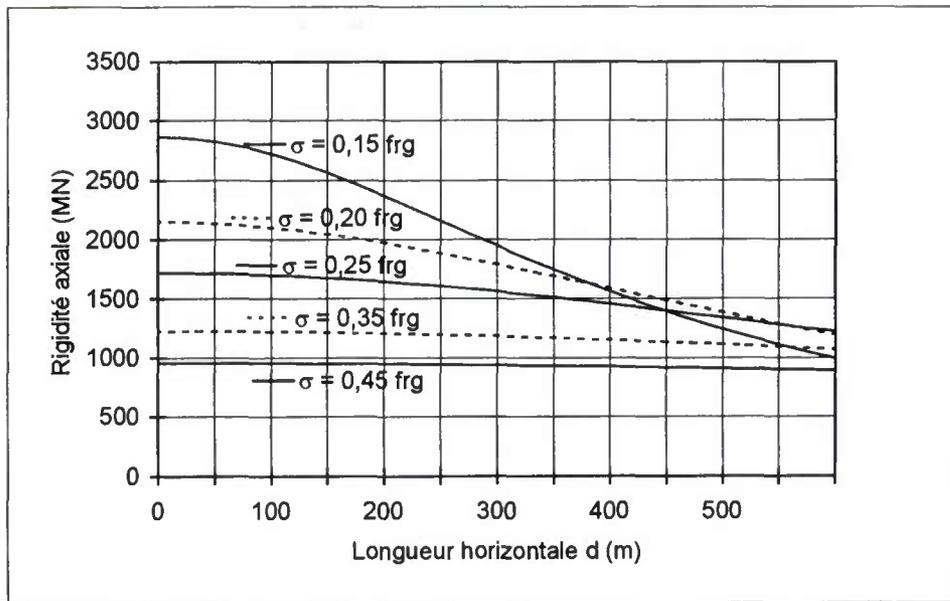
Graphique 1 : module effectif E^* d'un hauban en fonction de sa portée

Toutefois, il faut se garder d'une fausse interprétation de ce graphique, qui conclurait qu'un hauban est d'autant plus raide que l'on augmente son taux de travail. En effet, la rigidité axiale d'un hauban est gouvernée par le produit E^*S , plutôt que par le seul module E^* .

En pratique, partant d'une capacité portante donnée, on choisit la section transversale S en fonction de critères réglementaires (taux de travail limité à $0,5 f_{rg}$ par exemple) et d'objectifs de rigidité. Le graphique 2 ci-dessous indique la rigidité axiale E^*S d'un hauban de capacité portante constante F égale à 4 MN et de classe 1770 MPa. Ici, la section S varie en fonction du taux de travail autorisé, pour maintenir le produit $\sigma S = F$.

Ce graphique illustre que, pour les portées de haubans courantes jusqu'à 200 ou 300 m, la rigidité axiale augmente presque proportionnellement avec la section S , et donc en raison inverse du taux de travail. Ainsi, un hauban est d'autant plus raide que son taux de travail est faible.

Inversement, pour les très grandes portées de haubans, supérieures à 450 m, l'influence du terme géométrique devient prédominante et c'est plutôt en augmentant le taux de travail, donc en diminuant la section S , que l'on obtient un hauban plus raide.



Graphique 2 : rigidité axiale effective $E*S$ d'un hauban de capacité 4 MN en fonction de sa portée

5.6.3. Modèle d'un hauban réel

Dans le cadre d'une analyse linéaire à l'aide d'un programme de calcul de structure, un hauban peut être modélisé, au voisinage d'une tension d'utilisation F donnée, par un élément élastique non pesant ayant la section du câble réel et un module d'élasticité donné par la formule (63).

Le poids P du hauban doit alors être représenté par deux charges verticales concentrées P_A et P_B appliquées aux extrémités A et B du hauban et données par les formules (48). Toutefois, dans la plupart des cas, on peut se contenter de l'approximation :

$$P_A = P_B = P/2 \quad (64)$$

5.6.4 Modèle de la chaînette élastique

Dans les sections qui précèdent, l'accent a été mis sur l'aspect physique des phénomènes, en progressant par étapes, quitte à introduire au fur et à mesure des hypothèses simplificatrices – justifiées a posteriori par l'expérience – pour pouvoir aboutir à des formules pratiques.

Il existe cependant une approche radicalement opposée du comportement d'un hauban réel. Elle consiste à étudier le modèle mécanique le plus rigoureux possible, intégrant dès la mise en équation tous les phénomènes physiques, et notamment l'élasticité du matériau et la variation de poids linéique due à l'allongement.

Ce modèle repose sur un nombre très limité d'hypothèses :

- câble parfaitement flexible ;
 - poids linéique q constant sur toute la longueur du câble non tendu ;
 - câble parfaitement élastique caractérisé par sa rigidité axiale ES constante le long du câble.
- Sa portée est par conséquent très générale.

La clé de la mise en équations consiste à associer au point courant M du câble :

- d'une part, son abscisse curviligne s_0 à partir de l'origine O sur le câble non tendu (coordonnée lagrangienne) ;
- d'autre part, son abscisse curviligne s à partir de O sur le câble tendu (coordonnée eulérienne).

En utilisant ce paramétrage, les équations différentielles du problème s'écrivent :

- équations d'équilibre horizontal et vertical d'une portion de câble :

$$F \frac{dx}{ds} = H \quad (65)$$

$$F \frac{dz}{ds} = V + qs_0$$

- contrainte géométrique :

$$\left(\frac{dx}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dz}{ds}\right)^2 = 1 \quad (66)$$

- loi de Hooke :

$$F = ES \left(\frac{ds}{ds_0} - 1 \right) \quad (67)$$

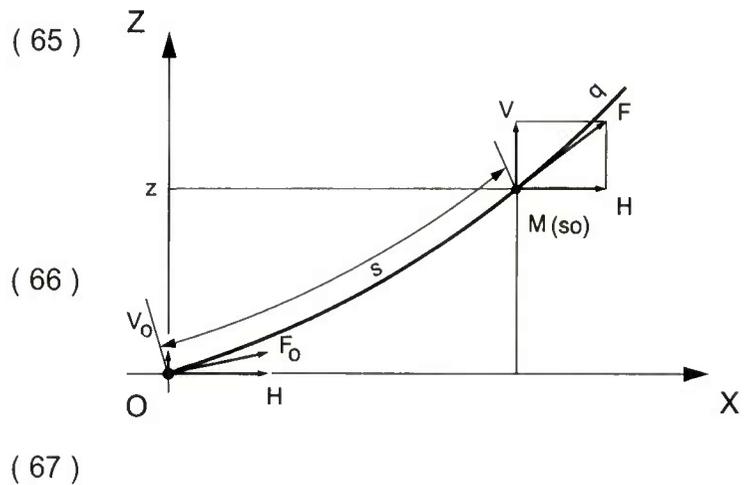


Figure 17 : paramétrage eulérien et lagrangien

La résolution de ce système d'équations permet d'obtenir, sous forme analytique, les équations paramétriques du profil en fonction de la variable s_0 , dès que l'on suppose connues les composantes (H, V_0) de la tension en O.

L'application de ce modèle se heurte à une difficulté pratique : les équations paramétriques obtenues n'admettent pas de solution analytique et l'on doit alors recourir à des méthodes numériques. Toutefois, le modèle de la chaînette élastique est utilisé par des logiciels de calcul de structures non linéaires avec grands déplacements, ou des logiciels de réglage de haubans.

CHAPITRE 6. FLEXION DES HAUBANS

L'analyse mécanique des haubans présentée dans le chapitre 5 néglige leur rigidité en flexion : les câbles de haubanage étant composés d'un assemblage de fils ou torons de faibles diamètres, ils ont une inertie de flexion très faible devant les autres éléments de la structure et aucun moment de flexion important ne s'y développe. Ils sont donc généralement supposés infiniment souples.

Cette approximation est très satisfaisante pour les calculs de structure dans tous les cas pratiques. Cependant, dans certaines situations, le câble subit une courbure importante générant des contraintes de flexion qui, combinées aux contraintes axiales de traction, peuvent compromettre la durabilité du hauban. C'est par exemple le cas pour les effets locaux, au niveau des ancrages ou des selles de déviation, où il est nécessaire de prendre en compte la raideur de flexion du câble.

Les deux premiers articles de ce chapitre explicitent les contraintes de flexion résultant de la courbure d'un câble, sur une selle de déviation, où le rayon de courbure est imposé, ou au niveau des ancrages lorsqu'un angle de déviation est imposé. L'article 6.4. examine plus finement les phénomènes qui se produisent au sein d'un câble courbé, au niveau des contacts inter-fils.

ARTICLE 6.1. HAUBAN DÉVIÉ PAR UNE SELLE

6.1.1. Expression des contraintes de flexion

La courbure d'un câble dans une selle de déviation introduit des contraintes de flexion se combinant aux contraintes axiales liées à la tension F . On ne considère ici que le comportement statique du câble.

Pour une selle de rayon R , donc de courbure $1/R$, le moment de flexion induit dans le câble est simplement $M = EI/R$, où I désigne l'inertie de la section du câble. La contrainte de flexion sur les fibres extrêmes du câble de rayon r vaut donc (en valeur absolue) :

$$\sigma_f = \frac{EI r}{R I} = \frac{Er}{R} \quad (68)$$

S désignant la section droite du câble, les contraintes totales extrêmes sont donc de la forme :

$$\sigma_{tot} = \frac{Er}{R} + \frac{F}{S} \quad (69)$$

On constate que les contraintes de flexion sur une selle ne dépendent que du rayon du câble, et pas de son inertie. Il convient d'utiliser les valeurs de rayon r , ou de diamètre $d = 2r$, adaptées au fonctionnement du câble : armatures parallèles indépendantes ou câble monolithique.

- Si les armatures constitutives du câble peuvent coulisser les unes par rapport aux autres au moment de la mise en tension, le diamètre à considérer est celui des fils ou torons individuels. C'est le cas des haubans multi-torons parallèles, généralement mis en place sur la selle et tendus toron par toron, ou des haubans multi-fils parallèles, préfabriqués puis déviés par la selle avant leur mise en tension.
- Au contraire, le fonctionnement des torons multi-couches déviés par une selle peut se rapprocher du câble monolithique : lorsque le câble est courbé sur la selle, il n'est pas encore

tendu et des réarrangements entre fils peuvent se produire. Au contraire, les flexions dynamiques qui peuvent survenir en service, à l'entrée de la selle, se produisent sur un câble tendu où les réarrangements sont quasiment empêchés. Dans ce cas, le diamètre convenable pour le calcul des contraintes de flexion est celui du toron complet.

6.1.2. Ordres de grandeur

Les selles de hauban ont généralement un rayon de l'ordre de 3 à 5 m. Le diamètre minimal des fils utilisés dans les haubans est de l'ordre de 5 mm. Le diamètre équivalent des torons à sept fils courbés avant d'être tendus est de l'ordre de 10 mm. Les torons multi-couches ont couramment un diamètre de l'ordre de 50 mm. Enfin le module d'Young des fils vaut 200 GPa, celui des torons 195 GPa et l'on peut estimer celui d'un câble TMC à 165 GPa. On en déduit les valeurs maximales de contraintes de flexion suivantes (en MPa) :

Rayon de la selle (m)	2,5	3	4	5
Fils Ø5	200	167	125	100
Torons T15	390	325	244	195
Torons multi-couches Ø50	1650	1375	1031	825

Quel que soit le rayon de la selle et les armatures utilisées, ces contraintes de flexion sont considérables, et souvent supérieures aux variations de contraintes dans les haubans dues aux charges d'exploitation. Les valeurs particulièrement élevées pour les câbles TMC, proches de la limite élastique de l'acier constituant les fils, mettent en évidence la nécessité des réarrangements entre fils qui réduisent quelque peu ces contraintes de flexion, mais peuvent s'accompagner d'usure.

Il convient donc au minimum de prendre en compte la flexion dans la justification des haubans déviés par une selle (voir chapitre 14). En outre, la pression radiale joue un rôle prépondérant dans les contacts entre fils, comme cela est décrit dans l'article 6.4. de ce chapitre.

ARTICLE 6.2. PRISE EN COMPTE DE LA RIGIDITÉ DE FLEXION DU CÂBLE À L'ANCRAGE

On emploie souvent des dispositions d'appui ou de fixation des haubans à la structure autorisant la rotation des ancrages (voir chapitre 10). Toutefois, après la mise en tension du câble, les dispositifs de rotation des ancrages par rapport à la structure sont le plus souvent bloqués pour les faibles rotations. Le blocage des armatures au niveau des ancrages doit alors être considéré localement comme un encastrement du câble dans la structure.

Même lorsque les articulations des ancrages sont conçues pour fonctionner sous charge (couteaux par exemple), l'inertie des pièces d'ancrages les transforme en pseudo encastremets pour les modes de vibration élevés.

Les déflexions angulaires du câble par rapport à l'axe de l'ancrage introduisent donc une courbure et un moment de flexion dans ce câble. On rappelle d'abord l'origine de ces déflexions, qui peuvent être statiques ou cycliques, avant d'analyser les surtensions qu'elles produisent dans les armatures.

6.2.1. Origine de la déflexion angulaire

On considère un câble encastré au niveau de son ancrage A, et dont l'axe de l'ancrage est dévié d'un petit angle ω de la direction asymptotique du hauban, c'est-à-dire de la direction du câble loin de l'ancrage. On se place dans le repère orthonormé O_{xy} , où O_x représente la direction asymptotique du hauban.

La déflexion angulaire ω entre l'axe de l'ancrage et la direction du câble peut résulter du cumul de plusieurs des effets suivants :

1. défaut d'implantation de l'ancrage dans la structure, en position et/ou en orientation ;
2. vibrations du hauban causant une rotation variable du câble au niveau de l'ancrage ;
3. rotation variable de l'ancrage par rapport au câble, sous l'effet des déplacements de la structure ;
4. surtension du câble, sous l'effet des charges d'exploitation par exemple, causant une déflexion angulaire variable par effet de chaînette.

La première déflexion est permanente. Elle se produit quand les ancrages du hauban ne sont pas orientés selon la direction théorique du câble, et qu'aucun dispositif de rotation ne permet de corriger ce défaut. Il convient de limiter ce phénomène au maximum, d'une part en appliquant des procédures adaptées lors de la mise en place de l'ancrage, et d'autre part, en utilisant des dispositions constructives permettant la rotation du câble avant et pendant sa mise en tension, telles que présentées au chapitre 10.

Des indications sur l'amplitude des déflexions dues aux vibrations du câble peuvent être tirées du chapitre 8.

L'amplitude du troisième effet dépend de la souplesse de la structure, et résulte de l'analyse structurale d'ensemble de l'ouvrage.

Enfin, le dernier effet se calcule à partir des résultats de l'analyse structurale d'ensemble : connaissant la surtension axiale d'un hauban $F_2 - F_1$, sous charges d'exploitation par exemple, on en déduit la déviation angulaire due à l'effet de chaînette grâce à l'équation (32) :

$$\Delta\omega = \frac{1}{2} qd \left(\frac{1}{F_2} - \frac{1}{F_1} \right) \quad (70)$$

où q désigne le poids linéique du hauban et d la distance horizontale entre les deux ancrages.

6.2.2. Flexion dans un câble sans guidage devant l'ancrage

Il s'agit du cas où aucun dispositif ne filtre les déflexions angulaires du câble, qui peuvent se développer jusqu'à l'ancrage proprement dit. La prise en compte de la raideur de flexion s'effectue alors en considérant le câble comme une poutre encastree, et en tenant compte des effets de second ordre.

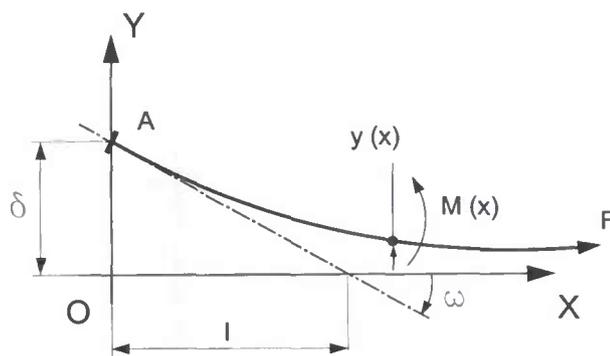


Figure 18 : flexion d'un câble sans guidage devant l'ancrage

La direction de l'ancrage est déviée d'un petit angle ω par rapport à la direction du hauban. Il en résulte accessoirement un décalage δ entre l'ancrage A et l'origine O, sans conséquence car δ est très faible devant la longueur du hauban. Le moment provenant de la tension du câble équilibre alors le moment de flexion $M(x)$ en tout point du câble :

$$M(x) = EI \frac{d^2 y}{dx^2} = Fy \quad (71)$$

En posant $k = \sqrt{\frac{F}{EI}}$ et en utilisant le fait que la pente à l'ancrage vaut $\tan \omega \approx \omega$, on obtient :

$$M(x) = M_{\max} \exp(-kx) \quad (72)$$

avec

$$M_{\max} = \omega \sqrt{EIF} \quad (73)$$

La flexion est maximale à l'ancrage et diminue exponentiellement le long du hauban, avec une longueur caractéristique $l_c = \frac{1}{k} = \sqrt{\frac{EI}{F}}$ qui dépend de l'inertie du câble. Cette flexion introduit des contraintes de flexion qui s'ajoutent à la contrainte normale de traction $\bar{\sigma} = \frac{F}{S}$.

6.2.3. Surtension maximale pour une déviation angulaire donnée

Au niveau de l'ancrage, la contrainte de flexion est maximale sur les fibres extrêmes du câble où elle vaut :

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{I/v} = \omega r \sqrt{\frac{EF}{I}} \quad (74)$$

r étant le rayon du câble.

L'inertie à prendre en compte dans cette formule diffère en fonction du type de câble, et en particulier selon que ses armatures constitutives peuvent coulisser les unes par rapport aux autres ou non. Contrairement au cas des selles, ce sont les conditions de service qu'il faut considérer ici, et par exemple la présence d'un produit de colmatage solidarissant mécaniquement les armatures du hauban (coulis de ciment sur torons clairs).

En pratique, le comportement réel d'un hauban se situe entre celui d'un câble monolithique, dont les sections droites restent planes, et celui d'un câble à fils parallèles. Ces deux situations extrêmes peuvent donc servir de fourchette.

6.2.3.1. Câble monolithique

Pour un câble monolithique circulaire de rayon extérieur r et de coefficient de remplissage κ , l'inertie I

est égale à $\frac{\kappa \pi r^4}{4}$ et la section résistante vaut $S = \kappa \pi r^2$, donc on a $\frac{S r^2}{4}$ et la surtension maximale

à l'ancrage vaut :

$$\sigma_{\max} = 2\omega \sqrt{\frac{EF}{S}} \quad (75)$$

soit $\sigma_{\max} = 2\omega \sqrt{E\bar{\sigma}}$

et la longueur caractéristique sur laquelle règne cette surtension est

$$l_c = \sqrt{\frac{EI}{F}} = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{E}{\bar{\sigma}}} \quad (76)$$

6.2.3.2. Câble à armatures parallèles indépendantes

Dans ce cas, chaque armature, fil ou toron, est courbée indépendamment. Il s'agit également de sections circulaires, et les formules (75) et (76) restent valables, en remplaçant le rayon extérieur du câble par le rayon de l'armature élémentaire r_{arm} .

La formule (75) ne dépendant pas du rayon du câble, la contrainte de flexion maximale est la même dans chaque armature que dans le câble monolithique :

$$\sigma_{max} = 2\omega \sqrt{\frac{EF_{arm}}{S_{arm}}} = 2\omega \sqrt{E\sigma} \quad (75')$$

En revanche, la longueur caractéristique sur laquelle règne cette surtension est maintenant

$$l_c = \sqrt{\frac{EI_{arm}}{F_{arm}}} = \frac{r_{arm}}{2} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \quad (76')$$

6.2.3.3. Ordres de grandeur

Comparons les ordres de grandeurs obtenus pour un hauban formé de 37 torons de classe 1770 MPa tendu à 40 % de sa limite de rupture :

	Diamètre (mm)	Contrainte moyenne σ (MPa)	Déviations angulaires ω (mrad)	Surtension σ_{max} (MPa)	Longueur caractéristique l_c (mm)
Câble monolithique	200	708	10	238	840
Torons indépendants	15	708	10	238	63
Fils parallèles	5	708	10	238	21

Ce tableau montre que, si aucune disposition de guidage n'est mise en place, les surtensions dues à la courbure sont très importantes, du même ordre de grandeur que les variations de contraintes dues aux charges d'exploitation. En revanche, cette surtension est la même, que le câble soit monolithique ou formé d'armatures indépendantes.

D'autre part, la longueur caractéristique sur laquelle règne cette surtension est considérablement diminuée quand les armatures peuvent coulisser les unes par rapport aux autres. Ce point a des conséquences sur la position appropriée pour le dispositif de guidage décrit ci-après.

Ainsi, les câbles monolithiques diffèrent des câbles à armatures parallèles indépendantes par la longueur sur laquelle s'établit la courbure devant l'ancrage ; la courbure maximale varie en raison inverse de cette longueur. Mais pour un angle de déviation donné, la surtension de flexion ne dépend pas de la nature du câble.

6.2.4. Flexion dans un câble avec dispositif de guidage devant l'ancrage

Pour limiter les déflexions angulaires là où elles sont le plus nocives, c'est-à-dire au niveau de l'ancrage proprement dit, un dispositif de guidage peut être prévu, à une distance appropriée de l'ancrage.

Le dispositif de guidage se comporte comme un appui simple, éventuellement élastique, disposé à une distance l de l'ancrage. Le moment de flexion dans le câble reste donc continu à la traversée du guide. Comme dans le cas précédent, la prise en compte de la raideur de flexion s'effectue en considérant le câble comme une poutre encastrée au niveau de l'ancrage A, et simplement appuyée sur le guide G.

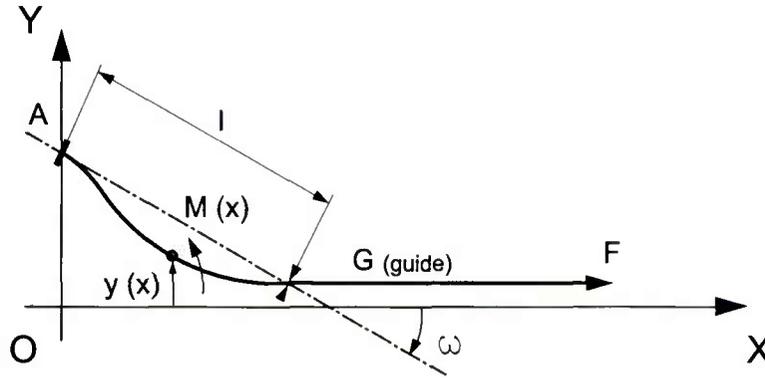


Figure 19 : flexion d'un câble avec dispositif de guidage devant l'ancrage

6.2.4.1. Guide rigide

Dans le cas d'un guide rigide, on est amené à résoudre un système hyperstatique, en tenant compte des effets de second ordre [8]. En posant $k = \sqrt{\frac{F}{EI}}$, les moments de flexion du câble, respectivement à l'ancrage et au niveau du guide, sont donnés par :

$$M_A = \omega \sqrt{EIF} \frac{kl - \sinh kl}{2 + kl(\exp kl) - 2 \cosh kl - \sinh kl} = \beta_A M_{\max} \quad (77)$$

$$M_G = M_A \frac{kl(\cosh kl) - \sinh kl}{kl - \sinh kl} = \beta_G M_{\max}$$

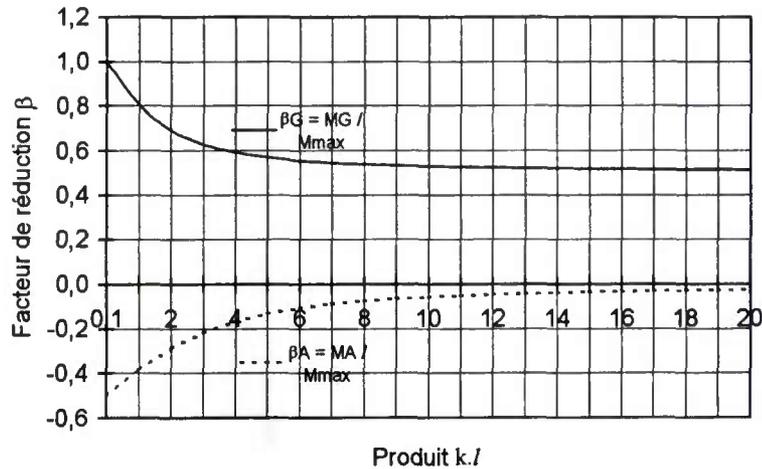
avec

$$\beta_G = \frac{kl(\cosh kl) - \sinh kl}{2 + kl(\exp kl) - 2 \cosh kl - \sinh kl} \quad (78)$$

L'effort tranchant repris par le guide est :

$$V_G = M_A \frac{k(1 - \cosh kl)}{kl - \sinh kl} \quad (79)$$

La courbe suivante donne les valeurs des facteurs de réduction β_A et β_G en fonction du produit adimensionnel kl .



Graphique 3 : coefficients de réduction de la flexion grâce à un dispositif de guidage

On constate que le dispositif de guidage permet de réduire très sensiblement le moment de flexion à l'ancrage. Cependant, on ne peut pas abaisser le moment de flexion au niveau du guide en dessous de la valeur $\frac{1}{2} M_{\max}$ avec un guide rigide.

6.2.4.2. Guide élastique

Le dispositif de guidage est généralement fixé sur un tube métallique contenant le hauban. Ce tube se prolonge souvent jusqu'à l'ancrage où il est lié rigidement à la structure (tube coffrant pour un tablier en béton par exemple). Lorsque la longueur libre du tube devient importante, il peut fléchir transversalement, et dans ce cas, le dispositif de guidage se comporte comme un appui élastique plutôt que comme un appui rigide.

On peut également concevoir un dispositif de guidage ayant par lui même une certaine souplesse pour obtenir des possibilités de réglage plus vastes encore, en agissant sur la position du guide et sur sa raideur. Une modélisation adaptée doit alors être employée.

ARTICLE 6.3. VIBRATIONS D'UN HAUBAN EN PARTIE COURANTE

La courbure engendrée par les vibrations d'un hauban se calcule à partir de l'amplitude de la déformée du câble et du mode de vibration prépondérant (voir chapitre 8) On peut en déduire les contraintes de flexion correspondantes par l'application de la formule (68).

Excepté pour des modes de vibration élevés, la courbure liée aux vibrations est généralement très faible si bien que les glissements interfilaires sont très limités. Les sections planes du câble restant planes, le hauban se comporte comme un câble monolithique et reste sollicité dans le domaine de l'endurance.

ARTICLE 6.4. FLEXION DES CÂBLES ET DURABILITÉ

6.4.1. Insuffisance du paramètre contrainte de flexion

De nombreux essais de fatigue par flexion ont été effectués pour relier la durée de vie en fatigue des câbles au moment de flexion dû à des déflections angulaires. Mais il s'avère difficile d'établir une corrélation unique entre sollicitation de flexion en fatigue et nombre de cycles jusqu'à la rupture du premier ou deuxième fil.

Pour les torons multi-couches sollicités en fatigue par flexion, on constate souvent que des ruptures de fils se produisent sur la première couche interne avant d'atteindre les couches périphériques du câble. Les faits expérimentaux permettent donc d'affirmer que la contrainte de flexion ou le moment maximum ne sont pas les seuls paramètres déterminant de la durée de vie en fatigue d'un hauban. Les phénomènes UIP et FIP d'usure et fatigue liés aux contacts entre fils ou entre fils et dispositifs de déviation et d'ancrage s'avèrent prépondérants.

En particulier, pour les torons multi-couches, une déflexion angulaire conduit rapidement à des glissements entre couches successives. Ces glissements sont d'amplitude maximale à proximité de la fibre neutre (du point de vue de la flexion plane), ce qui explique qualitativement l'apparition des premières ruptures de fils hors du plan de flexion et plutôt à proximité de la fibre neutre, là où se combinent des effets de glissement, pour l'amorçage de fissures, et de flexion pour leur propagation. Deux approches de ces phénomènes sont décrites dans la fin de ce chapitre.

6.4.2. Première approche : contrainte de contact – glissement

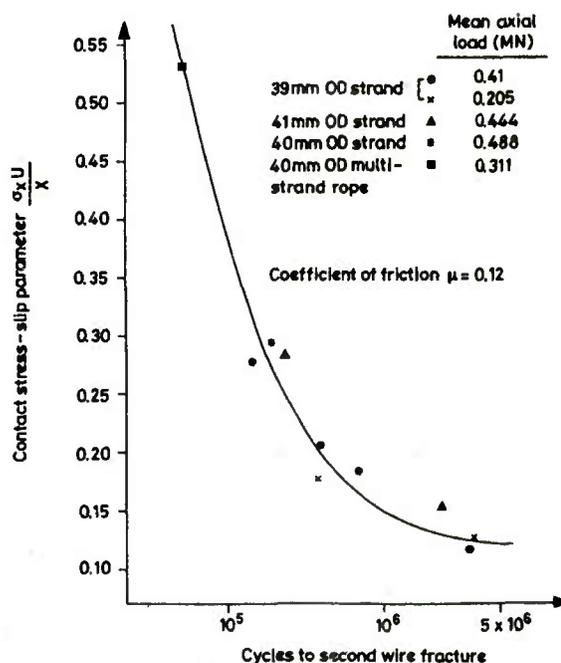
En faisant l'hypothèse que les câbles monotorons se comportent en flexion comme un cœur restant monolithique sur lequel glissent les couches périphériques, M. RAOOF a établi dans [23] une courbe de fatigue par flexion. Cette courbe est calibrée sur des résultats expérimentaux portant sur de nombreux TMC constitués de fils de 3,5 mm de diamètre sollicités en flexion alternée.

M. RAOOF utilise le paramètre "contrainte de contact – glissement" (contact stress – slip parameter)

$$\frac{\sigma_x U}{x} \text{ où :}$$

- σ_x est l'amplitude de contrainte de traction engendrée par le frottement, et calculée selon la théorie élastique des contraintes de Hertz à l'extrémité de la surface de contact en glissement total pour un coefficient de frottement de 0,12 ;
- U est l'amplitude de déplacement relatif entre deux couches successives au niveau de l'axe neutre, pour le premier contact croisé entre fils au delà de l'encastrement ;
- x est la distance entre deux points de contacts sur le fil considéré.

Le graphique 4 ci-contre donne la corrélation entre la contrainte de contact – glissement et le nombre de cycles de fatigue avant la rupture du deuxième fil de la couche extérieure. La limite d'endurance des câbles à 10 millions de cycles correspond à une valeur de ce paramètre de 0,10 MPa.



Graphique 4 : corrélation entre la contrainte de contact – glissement et le nombre de cycles jusqu'à seconde rupture de fatigue

6.4.3. Seconde approche : amorçage de fissures de fatigue

Une seconde approche de la fatigue par flexion des câbles a été développée par MM. BREVET et SIEGERT du LCPC. Elle est applicable aux torons multicouches ou à sept fils et repose sur l'application des critères d'amorçage de fissures de fatigue adaptés à la fatigue de contact. On utilise pour cela les caractéristiques de résistance à la fatigue du fil constitutif des torons : limite d'endurance et complaisance K.

6.4.3.1. Critère d'amorçage et de propagation de fissures

Au niveau des contacts inter-fils s'exerce un effort radial R qui résulte de la combinaison de :

- l'effort de traction axiale du câble F , dont la composante radiale est liée aux caractéristiques géométriques internes du câble (angle de toronnage, diamètre des fils, nombre de couches et numéro de la couche concernée, etc.)
- la courbure éventuelle, imposée à l'ensemble du câble par une selle de déviation ou un dispositif d'ancrage, qui génère une seconde composante radiale de l'effort axial F ;
- l'effet de groupe : lorsque plusieurs torons sont empilés au niveau des selles de déviation, les torons supérieurs exercent un effort radial sur tout toron inférieur.

L'effort résultant R est un effort normal à la surface de contact entre fils, surface ponctuelle pour les torons multi-couches à couches croisées, et linéique pour les torons à sept fils ou les torons à enroulement parallèle.

Les variations de courbure du câble par flexion alternée provoquent des glissements interfilaires, entre les couches successives, qui s'accompagnent à la surface des fils de forces de frottement tangentielles aux contacts et dirigées selon l'axe des fils de la couche externe. La connaissance de l'effort normal R et du coefficient de frottement permet de distinguer les zones de glissement total et les zones de glissement partiel.

Les forces de frottement engendrées par le croisement de plusieurs fils de la couche externe se cumulent le long d'un fil interne, sous la forme d'un effort d'entraînement dans la direction de ce fil interne. Cet effort d'entraînement engendre des contraintes que l'on note σ_{ent} (traction ou compression en surface du fil) et τ_{ent} (cisaillement au cœur du fil).

D'autre part, lorsque le câble est dévié, la flexion globale des torons s'accompagne de contrainte de flexion pure, que l'on note σ_f .

L'amorçage local de fissures se produit dès que le cumul des contraintes d'entraînement σ_{ent} et de flexion σ_f dépasse, en un point quelconque, les caractéristiques de résistance à la fatigue du fil élémentaire. Le critère d'amorçage de fissures consiste donc à vérifier si chaque point sous le contact interfilaire est dans des conditions d'endurance à durée de vie finie ou infinie.

Il existe une profondeur maximale au sein du fil pour laquelle les conditions d'amorçage de fissure à nombre de cycles fini sont atteintes. Si cette profondeur est suffisante, les contraintes de fatigue globales (traction axiale ondulée, flexion alternée, forces de contact et d'entraînement variables) permettent la propagation d'une fissure amorcée. Les contraintes de fatigue globales sont évaluées en fonction de la concentration géométrique de contrainte au fond de la fissure. Des critères multi-axiaux sont ensuite appliqués.



Photo 26 : faciès de rupture de fatigue d'un toron de précontrainte



Photo 27 : surface de contact usée (contact entre fils d'un câble à torons parallèles)



Photo 28 : surface de contact fissurée (fil d'une couche intérieure d'un câble monotoron multicouche à pas croisés)

6.4.3.2. Conséquences sur la conception des câbles

Les paramètres externes permettant de limiter l'amorçage et la propagation de fissures de fatigue sont :

- la limitation de la contrainte maximale de service ;
- l'augmentation des surfaces de contact entre fils, soit par augmentation du pas de toronnage, soit par prétension des câbles à une tension élevée ou par plastification des contacts, soit encore en préférant des contacts linéaires aux contacts ponctuels ;
- la limitation des variations de courbure, et de la courbure maximale, en augmentant le rayon des selles de déviation ou en réduisant les angles de déviation dans les ancrages ;
- la limitation des variations de contraintes de flexion, par amortissement des vibrations liées au vent ou au trafic ;
- la diminution des coefficients de frottement interfilaire, en utilisant un lubrifiant dont l'action peut être maintenue, ou au contraire le blocage de tout mouvement relatif entre fils, supprimant ainsi les phénomènes FIP et UIP.

Les expériences menées par MM. WATERHOUSE, PATZAK et SIEGERT indiquent que la limite d'endurance à 100 millions de cycles de torons multicouches à fils clairs ou galvanisés, sollicités à 50 % de leur contrainte à rupture, est de l'ordre de 100 MPa.

Pour des durées de vie plus courtes, mettant en jeu les phénomènes de fatigue de contact, l'étendue de fatigue à 2 millions de cycles peut atteindre 120 à 150 MPa. Ces valeurs ne prennent pas en compte la présence d'un lubrifiant efficace qui maintiendrait durablement le coefficient de frottement interfilaire en deçà de 0,2 (valeur en dessous de laquelle la limite d'endurance augmente).

6.4.4. Conclusion : dispositions constructives

En pratique, les dispositions constructives suivantes sont recommandées :

- Abandon des selles de déviation, en les remplaçant par des ancrages. Lorsque des selles sont malgré tout utilisées, prévoir un rayon de courbure suffisant (voir article 14.7.)
- Suppression de tout contact métallique fortuit entre câble et éléments d'ancrage ou de déviation.
- Utilisation de matériaux souples dans les zones de déviation : nylon, polychloroprène, zinc, alliage d'aluminium. Mise en œuvre d'un guide souple pour atténuer voire supprimer la flexion libre du câble en sortie d'ancrage, tant au niveau du tablier que du pylône.
- Injection de produits souples lubrifiants, pour diminuer le coefficient de frottement interfilaire, et emploi de câbles à fils galvanisés. Cette dernière pratique est liée à la protection de l'acier contre la corrosion, mais diminue également les coefficients de frottement et réduit la pression de contact entre fils. En effet, le zinc est écrasé et partiellement éjecté sur la périphérie des surfaces de contact.

CHAPITRE 7. MÉCANIQUE DES HAUBANS EN CONSTRUCTION

Le réglage des haubans est un point essentiel du projet, qui concerne successivement :

- la conception, où l'on recherche la géométrie de l'ouvrage souhaitée et une répartition optimale des efforts, aussi bien pendant la construction que dans la structure définitive ;
- l'exécution, le chantier devant disposer de procédures adéquates permettant de respecter au mieux les options retenues par le concepteur, tout en intégrant les conditions réelles de réalisation sur chantier.

Les deux premiers articles de ce chapitre sont assez conceptuels : la notion mécanique de chargement auto-équilibré (autocontrainte) sert de base à un inventaire critique des paramètres permettant de décrire le préchargement des haubans de façon intrinsèque. Le dernier article détaille le cas des haubans tendus toron par toron.

ARTICLE 7.1. PRÉCHARGEMENT DES HAUBANS

7.1.1. Haubans passifs et actifs

Dans certains cas, les haubans peuvent fonctionner comme des tirants passifs, ancrés sans effort notable sur la structure alors que celle-ci est encore sur cintre – quitte à prendre les précautions nécessaires pour supporter le câble afin d'éviter tout effet de chaînette. Leur mise en charge se produit au moment du décintrement, lorsque le poids propre vient s'appliquer à la structure. Aucune mise en tension par un moyen extérieur, tel qu'un vérin, n'est alors nécessaire.

Dans la pratique, la souplesse des haubans est telle que leur mise en charge nécessite un allongement important. La structure subit alors des déplacements et des déformations importants qu'elle ne peut absorber que si elle est suffisamment flexible. L'utilisation de haubans comme éléments structurels passifs ne peut donc s'envisager que dans des cas très particuliers, comme, par exemple, la mise en tension des suspentes d'un bowstring métallique par décintrement du tablier.

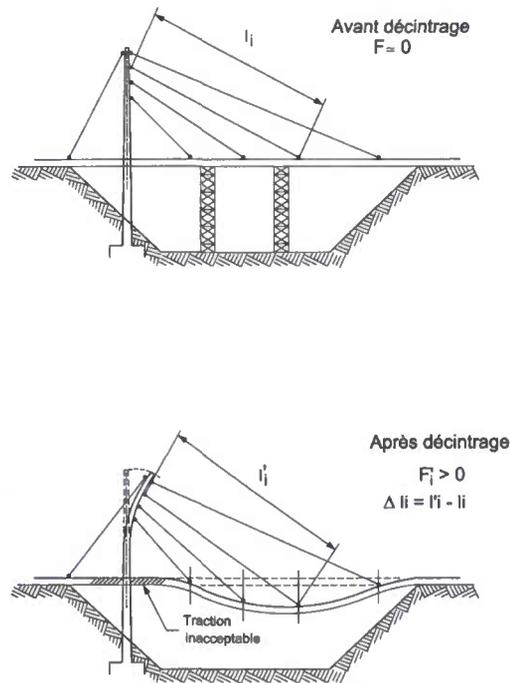


Figure 20 : utilisation de haubans comme éléments passifs

Un autre exemple est la couverture métallique du Stade de France, dont chaque tronçon est un élément suspendu par quatre haubans à un mât. Pendant la construction, cette suspension est isostatique, du fait de la symétrie, et les haubans ont été mis en place sans préchargement puis tendus par décintrement de chaque tronçon.

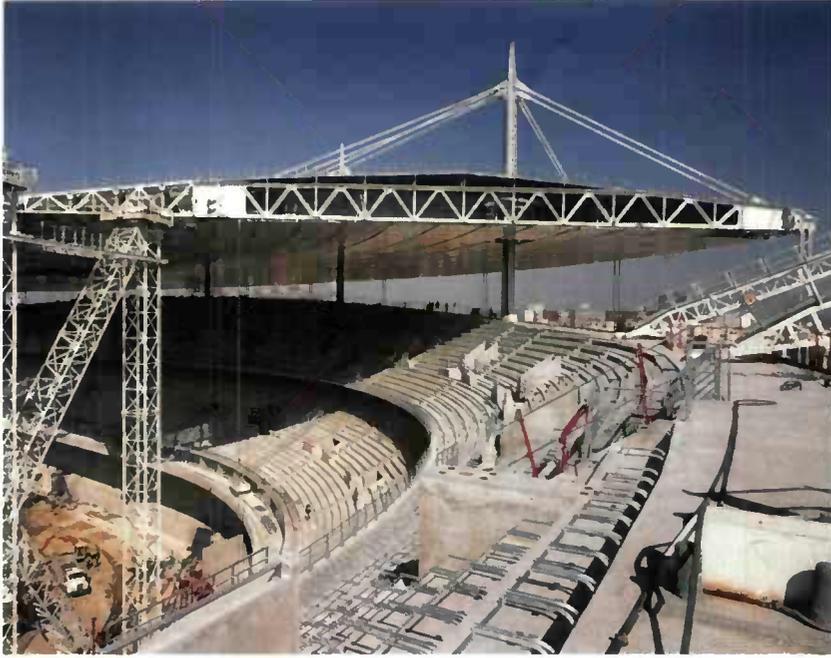


Photo 29 : le toit du stade de France sur palées provisoires.

Inversement, si l'on construisait sur cintre le tablier d'un pont à haubans en béton et si ce tablier était encastré sur le pylône, il se produirait au moment du décintrement une flèche importante dans la travée principale, avec pour conséquence un moment négatif non admissible au voisinage du pylône (figure 20). La solution pour éviter cet inconvénient consiste bien sûr à prétendre les haubans avec un vérin avant de procéder au décintrement. On a donc affaire cette fois à des éléments structurels actifs.

C'est pourquoi, dans la majorité des cas, les structures haubanées nécessitent une mise en tension des haubans. Elles sont en fait très hyperstatiques, et le préchargement des haubans par mise en tension n'est autre que l'introduction dans la structure d'un chargement auto-équilibré (champ d'autocontraintes). Ce chargement, sous la forme de deux forces de même direction et de sens opposés aux deux ancrages, ne génère globalement pas de réaction d'appui mais est équilibré par une distribution d'efforts dans la structure (moments de flexion dans le tablier et le pylône dans le cas d'un pont à haubans). Cette distribution d'efforts de préchargement permet à la structure de supporter avec des flexions très faibles les effets des charges permanentes.

Il est donc naturel de considérer un hauban comme un élément de structure préchargé (ou précontraint, mais l'usage en génie civil réserve souvent ce mot au "béton précontraint" par des câbles, compris dans l'épaisseur du tablier par exemple). Régler un hauban revient alors à lui imposer un préchargement d'intensité donnée.

7.1.2. Réglage des haubans du point de vue de la conception

Lors de la conception, la recherche du réglage d'un pont à haubans consiste à optimiser le réglage de la tension des haubans pour atteindre les objectifs suivants :

- contraintes admissibles dans les haubans et dans la structure, pendant la construction et après mise en service, sous charges variables ;
- si possible, moment de flexion nul ou très faible dans la structure soumise aux charges permanentes (poids propre et précontrainte éventuelle du béton) pour limiter les redistributions par fluage et faciliter le clavage.

La recherche du réglage optimal des haubans d'un pont est du domaine de la conception générale des ponts haubanés, et sort du champ de ce guide.

Toutefois, il peut être utile de rappeler que, du fait de la souplesse du tablier des ponts haubanés modernes, la tension de chaque hauban intermédiaire est très proche de celle qui régnerait si le tablier était articulé au niveau de chaque ancrage. C'est pourquoi cette tension équilibre les charges verticales agissant sur le tronçon de tablier porté par le hauban (tronçon limité longitudinalement par les points situés à mi distance entre le hauban considéré et ses voisins). Il s'agit de la règle "du pendule" qui s'exprime par la formule :

$$F_i \sin \alpha_i = \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \quad (80)$$

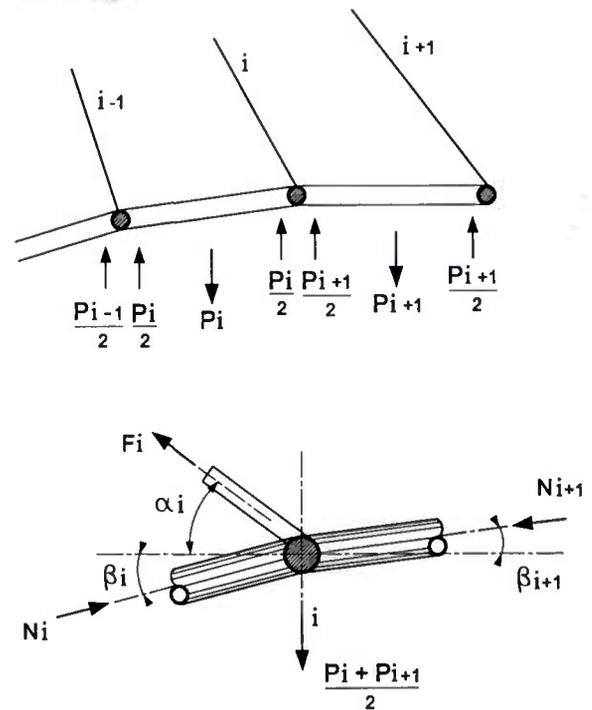


Figure 21 : illustration de la règle du pendule

De plus, une solution simple pour obtenir le réglage des haubans minimisant les flexions dans le tablier et dans les pylônes, consiste à annuler les flèches du tablier et assurer la verticalité des pylônes sous l'effet des charges permanentes. Pour cela, il suffit que le préchargement des haubans compense exactement leur allongement (ainsi que le raccourcissement du tablier et du pylône) sous l'effet des charges permanentes.

7.1.3. Phasage de construction

La pose ou la retension d'un hauban a des effets sur la tension des autres haubans. Comme les ponts à haubans sont généralement des structures très hyperstatiques, il n'est pas possible d'anticiper l'influence d'un hauban sur les autres, et sur les efforts dans le reste de la structure, sans le modèle numérique complet qui sert à la conception ou aux études d'exécution.

Les phases de construction sont souvent les plus critiques, pour les contraintes dans la structure et les haubans, du fait du poids de l'équipage mobile par exemple. C'est pourquoi une étude fine du phasage de construction ou de l'ordre des mises en tension, en modélisant au besoin le fluage du béton, est nécessaire au stade de la conception.

Par exemple, un recalage des haubans était nécessaire sur le pont de Brotonne, sept ans après la mise en service, pour compenser les effets du fluage. Il a été calculé que la tension du hauban le plus long devait être augmentée de 120 kN. C'est le hauban qui a été retendu en premier, et sa tension a alors été augmentée d'environ 1100 kN. Ensuite, le recalage des autres haubans a ramené l'augmentation de tension dans le premier aux 120 kN recherchés. Même si le résultat final ne dépendait pas de l'ordre des opérations, il fallait trouver un phasage tel que les contraintes dans le tablier et les pylônes, ainsi que les tensions de tous les haubans, restent admissibles pendant toutes les phases intermédiaires. En outre, les consignes de réglage étaient données en allongement [9].

Pour respecter les contraintes limites dans la structure pendant la construction d'un pont à haubans, il n'est généralement pas possible d'introduire le préchargement définitif des haubans dès leur installation. Le compromis entre les impératifs structurels en cours de construction et la simplification des opérations sur chantier conduit habituellement à régler les haubans en deux étapes :

- première mise en tension lors de l'installation du hauban ;
- reprise de tension après la pose des superstructures.

Dans certains projets, une troisième intervention, appelée réglage de maintenance, est nécessaire quelques années après la mise en service, pour compenser les effets du fluage du béton.

7.1.4. Réglage des haubans pendant la construction

Lors de la construction, le réglage des haubans consiste à introduire le niveau de préchargement prescrit par le bureau d'études dans chaque hauban, en respectant le phasage prévu.

Cette opération est souvent étroitement imbriquée avec le réglage de la géométrie de la structure (notamment lors de la construction par encorbellements successifs du tablier d'un pont haubané), et toutes les deux font appel à des mesures de tension ainsi que des levés topographiques. C'est pourquoi la distinction entre réglage de la tension des haubans, d'une part, et réglage de la géométrie de la structure, d'autre part, n'est pas toujours très claire. Il est pourtant fondamental de bien distinguer ces procédures.

7.1.4.1. Réglage de la géométrie

Pour un tablier métallique ou en béton construit par voussoirs préfabriqués, le réglage de la géométrie s'effectue lors de la préfabrication des tronçons, en usine. En effet, la construction consiste à placer un nouveau tronçon en vis à vis du dernier tronçon assemblé, et la géométrie relative de ces deux tronçons est prédéfinie par le joint de soudage ou de clavage. Cette géométrie est indépendante de l'état de tension des haubans, et une erreur de préfabrication, se traduisant par exemple par une cassure angulaire entre deux tronçons, ne peut pas être rattrapée sans appliquer à la structure des efforts parasites. Le plus grand soin est donc nécessaire lors de la préfabrication.

Pour un tablier ou un pylône en béton coulés en place, le réglage de la géométrie s'effectue au moment de l'ajustement du coffrage, avant le bétonnage. Il s'agit "d'aligner" le nouveau tronçon à bétonner avec la partie déjà réalisée (réglage de positionnement relatif). Des corrections peuvent être appliquées lors de ce réglage, pour compenser une imperfection géométrique de la partie déjà réalisée ou anticiper la flèche de l'équipage mobile sous le poids du béton frais. Ces corrections n'introduisent pas d'effort parasite dans la structure, mais modifient seulement localement sa forme.

7.1.4.2. Réglage des haubans

Le réglage des haubans agit sur la géométrie de l'ouvrage, puisqu'on introduit un chargement auto-équilibré dans la structure. Lorsque la géométrie de l'ouvrage réalisé n'est pas tout à fait conforme aux objectifs, il peut être tentant de "corriger" les imperfections géométriques par une modulation du réglage des haubans. Cette pratique est à proscrire pour trois raisons.

1. Le réglage des haubans est défini lors de la conception de l'ouvrage, et il importe de respecter ces prescriptions, sous peine d'introduire dans la structure des efforts parasites dépassant les contraintes admissibles. C'est particulièrement le cas pour les ouvrages en béton précontraint, dont la section résistante est souvent dimensionnée au plus juste.
2. Même avec un enregistrement rigoureux des réglages effectués, les modulations de tension effectuées par rapport aux consignes du bureau d'études sont rapidement perdues parmi d'autres causes de dispersion, liées aux tolérances d'exécution et aux précisions de mesures. L'analyse de l'état de la structure devient alors rapidement inextricable, ce qui rend plus difficile une action corrective réfléchie.
3. Les imperfections géométriques sont sans conséquences tant qu'elles restent locales. Il est donc inutile de perturber le réglage des haubans pour les masquer.

En revanche, si l'origine de l'erreur géométrique est systématique, on constate rapidement une divergence de la géométrie réelle par rapport aux objectifs. Il convient d'analyser rapidement les

causes de cette divergence : densité du béton non conforme aux prévisions, poids d'équipage mobile mal estimé, etc. La correction de ces causes nécessite un re-calcul de l'ouvrage, pour définir rationnellement un nouveau jeu de tensions des haubans.

En dernier recours, il est possible de régler les haubans déjà installés. En effet, des variations de tensions légères mais coordonnées sur tous les haubans sont très efficaces pour modifier le niveau d'ensemble du tablier, et par exemple permettre le clavage du tablier à la clé.

7.1.4.3. Instructions de réglage des haubans pendant la construction

Le réglage des haubans proprement dit s'effectue au cours de la mise en tension initiale, qui coïncide ou suit directement l'installation du hauban, et au cours des retensions successives éventuelles. A chaque étape, une instruction de réglage doit être fournie par le concepteur au responsable du haubanage sur le chantier. Il s'agit usuellement de consignes de mise en tension à un certain effort ou allongement. Toutefois, cette instruction doit être adaptée à la fois aux méthodes de calcul utilisées lors de la conception (modèle numérique du phasage de construction), et aux contraintes de réalisation sur le chantier.

L'article suivant passe en revue les paramètres utilisables pour caractériser le préchargement des haubans et comme instruction de réglage.

ARTICLE 7.2. CARACTÉRISATION INTRINSÈQUE DU PRÉCHARGEMENT DES HAUBANS

7.2.1. Caractère intrinsèque et tolérances d'exécution

On dispose a priori de plusieurs indicateurs distincts pour caractériser le degré de préchargement d'un hauban :

- la tension dans le hauban dans la structure achevée, sous charges permanentes ;
- la tension appliquée au hauban au moment de sa pose ou de sa retension ;
- l'allongement entre la longueur l_0 du hauban non tendu et la distance droite l entre ses ancrages pour un état de référence donné ;
- la prédéformation ε imposée au hauban pour un état de référence donné ;
- etc.

En fait, l'état instantané de la structure évolue constamment, ce qui s'accompagne de déplacements des points d'ancrages et de variations de la tension F des haubans. Ces évolutions concernent aussi bien les états statiques successifs correspondant aux différentes phases de construction, que les déformations différées (retrait, fluage) ou l'action des chargements extérieurs (charges de chantier, superstructures, effets thermiques, charges d'exploitation). La plupart des grandeurs mécaniques définissant l'état des haubans varient donc sans cesse.

Un indicateur caractérise de façon intrinsèque le préchargement d'un hauban lorsqu'il est indépendant de l'état instantané de la structure. Le fait qu'un indicateur soit intrinsèque ne signifie pas qu'il est invariant : en effet, le préchargement d'un hauban augmente lors de chaque reprise de tension, et l'indicateur doit refléter ces augmentations, qui ne sont pas des fluctuations instantanées mais bien l'introduction d'un nouveau chargement auto-équilibré dans la structure.

La plupart des indicateurs ci-dessus s'affranchissent des fluctuations instantanées car ils sont mesurés par rapport à un état de la structure donné : structure achevée et à vide, ou bien structure au moment de la mise en tension dans le phasage prévu, ou bien encore structure dans un état de référence conventionnel. Le choix de l'un ou l'autre de ces paramètres est indifférent au stade de la conception, pour peu que les conventions soient clairement précisées (état de référence).

Il n'en est pas de même au stade de la construction, du fait des tolérances de mesure. Les différentes caractérisations du préchargement des haubans sont plus ou moins sensibles à ces tolérances, dont les ordres de grandeurs sont rappelés ici :

- la précision de mesure de la force introduite avec un vérin est couramment de l'ordre 2 % ;
- l'incertitude sur la longueur des câbles est de l'ordre de 10 mm par 100 mètres de câble mesuré, soit 0,01 %. Des précisions meilleures exigent de grandes précautions de mesure ;
- la précision sur l'estimation du poids propre de la structure à partir de la densité des matériaux est environ de 2 à 5 % même si la densité du béton est mesurée puis corrigée en tenant compte du ferrailage passif et de la précontrainte ;
- les incertitudes sur les poids des matériels de chantier (équipement mobile, chèvre de levage, matériels divers portés pas le tablier, etc.) sont souvent plus importantes et difficiles à quantifier.

Le gradient thermique dans le tablier, ainsi que l'écart de température entre la structure et les haubans sont également des conditions d'environnement difficiles à mesurer. Par exemple, le gradient thermique peut provenir des variations de températures journalières (ensoleillement), mais aussi de l'exothermie de prise et du refroidissement du béton, qui se produisent différemment selon l'épaisseur des éléments bétonnés (dalle fine ou nervure massive, etc.). On essaie de s'en affranchir en effectuant les mesures au lever du soleil, quand les perturbations thermiques sont minimales.

7.2.2. Tension permanente dans l'ouvrage achevé

On peut caractériser le préchargement des haubans par leur tension, dans la structure sous charges permanentes (structure à vide), à la mise en service ou à une date ultérieure (par exemple, cinq ans après la mise en service). En effet, cette indication, complétée par la donnée des réactions d'appuis ou du phasage, permet en théorie de déterminer les efforts et déformations permanents en chaque point de la structure achevée.

Toutefois dans la pratique, la valeur de la tension d'un hauban en place ne constitue pas un indicateur très précis de son degré de préchargement, ni de l'état de la structure, si on ne la complète pas avec des données géométriques.

L'exemple du pont Vasco de Gama est instructif : il s'agit d'un pont symétrique à deux pylônes présentant une travée centrale de 400 m et un tablier en béton. Un recalage des haubans sera nécessaire pour compenser les effets du fluage. Les calculs prédictifs montrent que le niveau de la clef sera relevé de près de 70 cm par la retension de l'ensemble des haubans, alors que la tension de chaque hauban ne sera pas modifiée de plus de 2 % en fin d'opération. Du fait des incertitudes de mesure, le suivi de l'évolution du fluage ne peut donc pas être effectué avec les tensions permanentes des haubans.



Photo 30 : le pont Vasco de Gama en cours de construction

7.2.3. Tension initiale à la pose du hauban

La force de mise en tension est couramment utilisée pour décrire le préchargement d'un hauban, notamment au moment de la conception. En effet, simuler une opération de mise en tension par l'application d'une force aux ancrages est une démarche naturelle dans les logiciels de calcul phase par phase.

Toutefois, l'effort de mise en tension d'un hauban n'est pas une caractéristique intrinsèque de son réglage ; par exemple tendre un hauban ancré en extrémité d'encorbellement à une valeur donnée ne produit pas les mêmes effets sur la structure définitive si cette opération s'effectue en présence ou non de charges de chantier parasites. Il faudrait donc compléter la donnée de la tension initiale par la définition précise des conditions de la structure lors de la mise en tension.

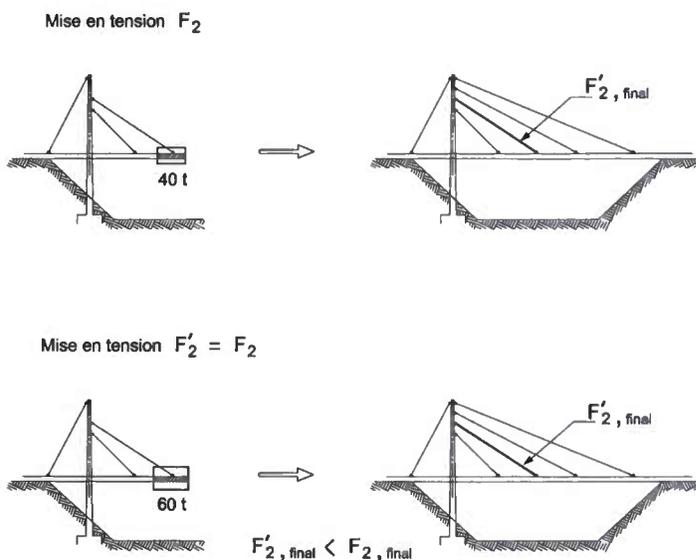


Figure 22 : influence des charges de chantier sur la tension finale

Cette démarche est fastidieuse pour le concepteur, car il est nécessaire de recalculer l'ensemble des valeurs de mise en tension, si le poids de l'équipage mobile est amené à évoluer en cours d'étude. Mais le recours à la tension initiale est encore plus délicat lors du réglage des haubans sur chantier : l'application directe de la tension initiale fournie par le bureau d'études ne conduira au préchargement correct des haubans que si le modèle numérique reflète strictement les conditions réelles pendant l'opération de réglage. Même avec des mises à jours du modèle et des prescriptions contraignantes sur les conditions de chantier, la concordance du modèle et de la réalité n'est qu'imparfaite, notamment du fait des conditions de température et des imprécisions sur le poids propre.



Photo 31 : le pont d'Uddevalla en cours de construction

7.2.4. Flèche du tablier

Une autre limitation de l'usage de la tension initiale pour le réglage des haubans apparaît dans le cas des structures souples : la tension est fixée par la règle du pendule (voir section 7.1.2.) et la composante verticale reste quasiment la même quelle que soit la longueur du câble. Cette méthode conduit à des oscillations dans les tensions, un hauban trop tendu étant suivi par un hauban sous tendu, et ainsi de suite.

Une parade a été envisagée dans le cas des tabliers très souples, consistant à tendre le hauban jusqu'à donner la bonne flèche au tablier au droit du hauban. Cette méthode n'est pas utilisable lorsque la structure est rigide, et notamment pour le réglage des premiers haubans d'un encorbellement encastré sur le pylône. Recourir à deux méthodes différentes selon que l'on se trouve dans une partie souple ou rigide n'est pas non plus très satisfaisant.

Enfin, la flèche du tablier ne caractérise pas directement le préchargement des haubans, et introduit au contraire une confusion inopportune entre le réglage géométrique et le réglage du préchargement des haubans.

7.2.5. Longueur à tension nulle

La longueur à tension nulle l_0 d'un hauban est la longueur de câble mesurée entre ancrages, quand le hauban n'est pas tendu et repose sur un support horizontal qui annule les effets de poids propre. Tout comme la masse du câble, l_0 est une grandeur intrinsèque, indépendante des conditions auxquelles est soumis le hauban en place dans l'ouvrage.

Le préchargement d'un hauban est entièrement déterminé par les trois informations suivantes :

- la définition d'un état de référence (on choisit le plus souvent la géométrie qui est définie par les plans et qui est utilisée pour constituer le modèle de calcul de l'ouvrage),
- la distance l entre les ancrages fixés sur la structure, lorsque celle-ci est dans son état de référence,
- la longueur l_0 du hauban non tendu, inférieure à la distance l .

Il est théoriquement possible d'effectuer le réglage des haubans à partir de la longueur à tension nulle, en mesurant de façon précise la longueur l_0 des haubans lors de leur fabrication puis en les tendant par un moyen approprié pour accrocher les ancrages sur la structure. Cette méthode est

insensible aux conditions réelles d'exécution (charges parasites, température, etc.) Elle est notamment intéressante pour les haubans préfabriqués en usine.

Toutefois, le réglage à la longueur est sensible aux tolérances géométriques, et n'est utilisable que si la distance réelle l entre ancrages est connue avec une très bonne précision – de l'ordre de quelques millimètres. C'est donc un cas de figure rare dans la pratique, mais parfois envisageable pour les structures métalliques assemblées sur cintre. La précision d'implantation usuelle des ancrages dans un tablier en béton est plutôt de l'ordre de quelques centimètres, et l'on doit alors recourir à des méthodes indirectes, capables de s'affranchir de ces tolérances.

Cette méthode de réglage a par exemple été employée pour les haubans du pont d'Oresund, construit en plaçant avec une bigue les tronçons du tablier métallique sur des palées provisoires.



Photo 32 : le pont d'Oresund en cours de construction

En faisant abstraction des tolérances sur l'implantation des ancrages ou sur la température du câble, on détermine la précision relative de mesure de longueur $\delta = \Delta l_0 / l_0$ nécessaire pour obtenir une précision ΔF de 1 à 2 % sur la tension finale du hauban. On peut établir la relation :

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\delta}{\varepsilon} \quad (81)$$

où ε est la prédéformation du hauban (voir section suivante). Comme ε vaut généralement de l'ordre de $3 \cdot 10^{-3}$ sur les ponts haubanés, on en déduit qu'une précision relative δ de $5 \cdot 10^{-5}$ soit 0,005 % sur la mesure de longueur est nécessaire pour obtenir la précision recherchée sur la tension. Cette précision est proche de la limite technique du mesurage et impose beaucoup de précautions sur le mode opératoire.

7.2.6. Prédéformation et tension de référence

Deux dernières notions permettent de caractériser de façon intrinsèque le préchargement d'un hauban : la prédéformation ε et la tension de référence F_{ref} .

La **prédéformation** ε est la variable adimensionnelle définie par :

$$\boxed{\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l - l_0}{l_0}} \quad (82)$$

avec les notations de la section précédente.

Elle s'interprète physiquement comme la déformation que l'on doit imposer au hauban, supposé non pesant, pour amener par force ses extrémités en coïncidence avec la position qu'occupent les ancrages dans l'état de référence. Pour les ponts haubanés habituels, elle est voisine de $3 \cdot 10^{-3}$ avec en général une valeur légèrement supérieure pour les ouvrages en béton et une valeur inférieure pour les ouvrages métalliques et mixtes pour lesquels la part des charges permanentes est plus faible.

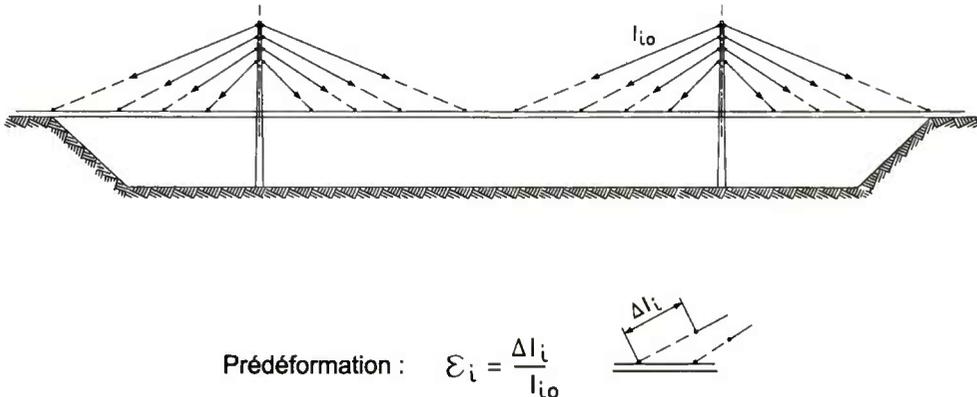


Figure 23 : interprétation physique de la prédéformation d'un hauban

La **tension de référence** F_{ref} d'un hauban est la tension de ce hauban quand on oblige ses extrémités à coïncider avec la position qu'occupent les ancrages dans l'état de référence. C'est donc l'homologue en effort de la prédéformation ci-dessus, donnée par la formule suivante, sous l'hypothèse d'un comportement linéaire :

$$F_{ref} = ES\varepsilon \quad (83)$$

Ce concept reste applicable en prenant en compte l'effet de chaînette. Il faut alors préciser si la tension de référence d'un hauban représente la tension F_A à l'ancrage inférieur, ou la tension F_l suivant la corde (voir chapitre 5.)

Le paramètre ε est une variable intensive (au sens physique du terme) qui permet de comparer d'un projet à l'autre le degré de préchargement adopté pour les haubans, indépendamment de leur section et donc des charges qu'ils équilibrent. Au contraire, la tension de référence est une variable extensive, qui donne une idée moins abstraite de la force du hauban. Les deux grandeurs reposent sur le choix d'un **état de référence**. Il s'agit d'un état purement conventionnel, et l'on choisit le plus souvent la géométrie qui est définie par les plans et qui est utilisée pour établir le modèle de calcul de l'ouvrage.

Si l'on utilise le modèle de comportement linéaire du hauban, et l'on mesure les déplacements à partir de l'état de référence, on peut réécrire la formule (15) pour faire apparaître la tension de référence :

$$\boxed{F_{ref} = F - ES \frac{l - l_{ref}}{l_{ref}} + ES k \Delta \theta} \quad (84)$$

Ecrite ainsi, la formule (84) montre clairement que, même si la tension d'un hauban et la position de ses ancrages varient en fonction des conditions instantanées ou des phases d'exécution, le second membre reste néanmoins constant et égal à la tension de référence. Cet exemple, que

l'on pourrait étendre au modèle de la chaînette, démontre bien le caractère intrinsèque de la grandeur F_{ref} .

En conclusion, de même que la longueur à vide du hauban, les grandeurs ε et F_{ref} ne varient pas tant que l'on ne retend pas le hauban, car elles caractérisent le préchargement de façon intrinsèque. En revanche, ces paramètres augmentent lorsque l'on retend le câble, soit en diminuant la longueur à vide de toron comprise entre ancrages, pour les haubans MTP ancrés par clavettes, soit, pour les autres ancrages, en reculant la tête d'ancrage par rapport à la structure par vissage d'une bague ou interposition de cales entre la tête et son appui sur la structure.

ARTICLE 7.3. CALCUL DE LA TENSION INSTANTANÉE DES HAUBANS

Quel que soit le paramètre utilisé pour caractériser le préchargement des haubans, il peut être utile de calculer la tension instantanée d'un hauban de la structure dans un état quelconque (phase d'exécution ou chargement). Ce calcul est a priori délicat, du fait du caractère hyperstatique de la structure.

7.3.1. Méthode du démontage

Il existe une démarche systématique qui permet de calculer la tension instantanée d'un hauban à partir de sa tension permanente (définie dans la section 7.2.2.) : elle consiste à simuler, sur le modèle de calcul, le démontage de l'ouvrage en partant de l'ouvrage terminé, et en réalisant à chaque phase élémentaire l'action opposée à celle effectuée au moment de la construction, jusqu'à atteindre l'état recherché. C'est la méthode dite du démontage.

Cette méthode est fastidieuse, car on doit procéder à l'analyse de toutes les phases intermédiaires pour connaître la tension d'un hauban à une étape donnée. De plus, elle reste tributaire des imprécisions sur les charges de chantier (poids de l'équipage mobile notamment), et cette méthode ne peut pas prendre en compte les effets du fluage et du retrait car les logiciels ne sont pas prévus pour faire reculer le temps !

7.3.2. Méthode de la tension de référence

Il existe une méthode alternative à la méthode du démontage, lorsque l'on connaît ou que l'on calcule la position des ancrages dans l'état considéré. Cette méthode s'affranchit du calcul de la structure complète, en ne considérant que le système mécanique constitué d'un seul hauban : on peut évaluer les efforts intérieurs de ce système à partir des conditions aux limites (position des ancrages) et de la connaissance des charges réparties auxquelles il est soumis (température, poids linéique).

En effet, il suffit d'utiliser la loi de comportement du hauban, à partir de l'état de référence (structure à sa position théorique définie par les plans), et utiliser le fait que la tension réelle F du hauban dans l'état considéré est égale à la tension de référence F_{ref} , modifiée par le fait que les ancrages ont subi un déplacement δ_A et δ_B par rapport à la position qu'ils occupaient dans l'état de référence, et par des corrections thermiques éventuelles.

Par exemple, sous l'hypothèse d'un comportement linéaire, on peut utiliser la formule (17) du chapitre précédent :

$$F = F_{ref} + \frac{ES}{l_{ref}} (\delta_B - \delta_A) \cdot t - ES\alpha\Delta\theta \quad (85)$$

Cette formule est particulièrement utile pour le contrôle de la tension des haubans sur un chantier : les déplacements des ancrages sont obtenus par des levés topographiques, et le résultat de la formule peut être comparé à la lecture d'une cellule de mesure de tension.

Au stade de la préparation du chantier, les déplacements des ancrages peuvent être obtenus par le calcul d'une seule phase de construction sur le modèle général, les haubans étant définis par leur prédéformation ε ou leur tension de référence F_{ref} , et l'on en déduit directement l'effort de réglage à introduire dans la phase considérée.

ARTICLE 7.4. MISE EN TENSION TORON PAR TORON

Les haubans de grande longueur constitués de torons parallèles sont de plus en plus fréquemment installés sur l'ouvrage toron par toron : chaque toron est hissé ou poussé dans le hauban, puis mis en tension au moyen d'un vérin monotoron (voir chapitre 12.) Un dispositif adapté permet de garantir que tous les torons installés ont la même tension ou la même longueur neutre².

Du fait de la flexibilité de la structure, les ancrages haut et bas se rapprochent au cours de l'installation du hauban, si bien que la tension des torons déjà installés varie pendant la mise en place de nouveaux torons. On décrit ici l'évolution de la tension unitaire F_n de chaque toron, après l'installation de n torons.

7.4.1. Approximation linéaire

Soit K la raideur élastique de la structure dans la direction du hauban (cette raideur est tirée des coefficients de souplesse des ancrages haut et bas dans le modèle de calcul de la structure sans le hauban considéré). Le rapprochement des ancrages A et B , sous l'effet de la tension F du hauban, vaut :

$$\Delta l_{AB} = \frac{F}{K} \quad (86)$$

On utilise le modèle linéaire du hauban. Lorsque n torons de longueur l_0 sont tendus à un effort F , ils s'allongent tous de :

$$\Delta l_h = \frac{F}{nEs / l_0} \quad (87)$$

où E est le module élastique des torons, et s est la section unitaire d'un toron (la section du hauban est donc $S = ns$).

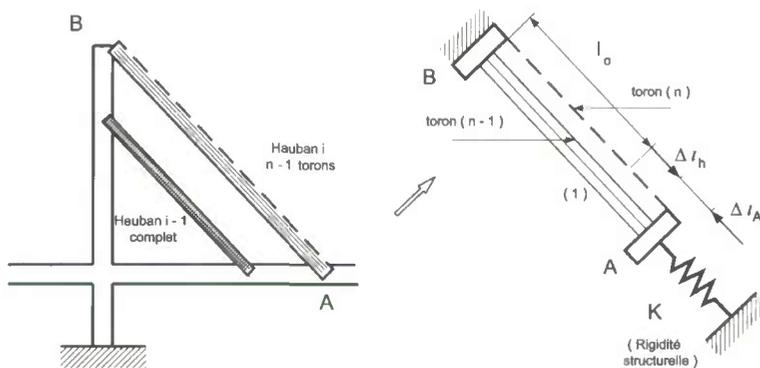


Figure 24

Si le chargement extérieur de la structure demeure inchangé, la somme des deux allongements Δl_{AB} et Δl_h reste constante au cours de la mise en tension des différents torons (voir figure 24).

² Le procédé Isotension[®] breveté par la société Freyssinet International garantit que tous les torons ont la même tension qu'un toron équipé d'une cellule de mesure de force, appelé toron de référence. D'autres procédés utilisent l'égalité des allongements des torons maintenus parallèles sur toute leur longueur.

Soit δ cette valeur constante :

$$\delta = F \left[\frac{1}{nES / l_0} + \frac{1}{K} \right] \quad (88)$$

La tension unitaire F_n de chaque toron, après l'installation de n torons, vaut finalement :

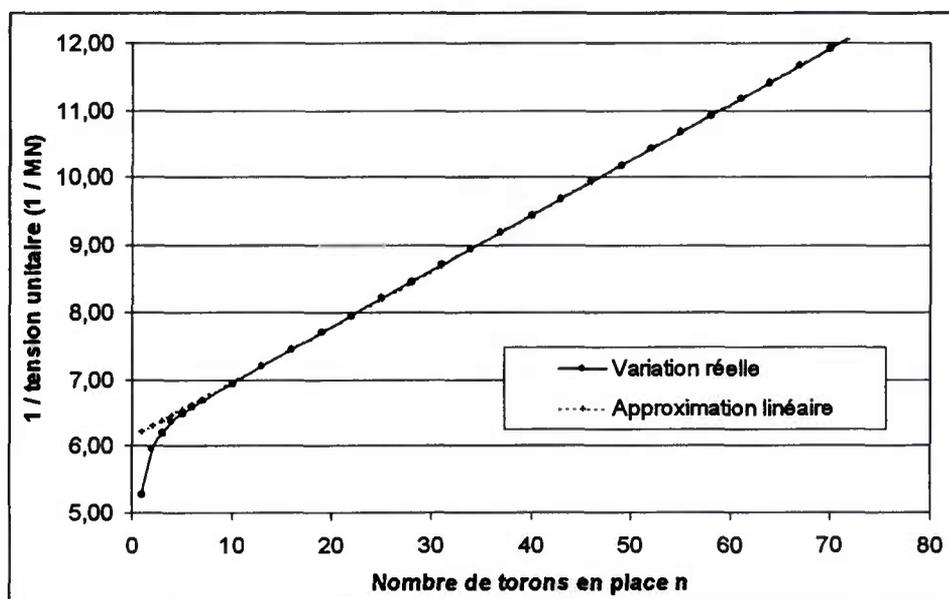
$$\frac{1}{F_n} = \frac{n}{F} = \frac{1}{\delta} \left[\frac{l_0}{ES} + \frac{n}{K} \right] \quad (89)$$

7.4.2. Evolution réelle de la tension

En réalité, le comportement des torons est non linéaire lors de la mise en tension (effet de chaînette). En outre, le poids de la gaine collective, quand il en est prévu une, perturbe l'évolution de la tension des torons : en l'absence de câble auxiliaire supportant la gaine, celle-ci repose d'abord sur le premier toron enfilé, son poids propre étant alors entièrement supporté par ce toron, puis son poids est réparti entre tous les torons mis en place.

En pratique, l'évolution réelle de la tension unitaire des torons s'éloigne du modèle linéaire pour les cinq à dix premiers torons. Les effets de chaînette et de la gaine générale peuvent ensuite être raisonnablement négligés, comme en témoigne le graphique 5 ci-dessous.

Enfin, il est utile de rappeler que l'inverse de la tension $1/F_n$ évolue linéairement seulement si le chargement extérieur de la structure demeure inchangé. Toute charge extérieure appliquée pendant l'installation des torons, par exemple le déplacement d'une charge de chantier sur le tablier, perturbe la droite des $1/F_n$. L'utilisation pour l'installation des haubans du modèle présenté dans ce chapitre imposerait donc de sévères contraintes d'exécution. En revanche, ce modèle est utile pour effectuer des contrôles.



Graphique 5 : variation de la tension unitaire en fonction du nombre de torons en place

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 8. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES HAUBANS

Le chapitre 4 détaille les phénomènes aérodynamiques responsables des vibrations des haubans et propose des mesures correctives. Pour compléter cette approche physique, il a paru utile de rappeler dans le présent chapitre les outils mathématiques de l'analyse dynamique des haubans.

La réponse dynamique d'un hauban à des excitations est calculée par le biais d'une analyse modale que l'on peut résumer en trois étapes :

1. on détermine les modes propres de vibration du hauban (étude des vibrations libres) ;
2. on étudie l'amplitude de chaque mode en réponse à une excitation extérieure donnée ;
3. on combine les différents modes pour obtenir l'amplitude de réponse totale du hauban.

Les modes propres d'un hauban sont caractérisés par les fréquences propres de vibration et les déformées modales. C'est l'objet de l'article 8.1. qui rappelle l'approximation de la corde vibrante, puis de l'article 8.2. qui aborde les modes propres d'un hauban pesant. Enfin, les articles 8.3. et 8.4. concernent la réponse d'un hauban au déplacement transversal ou longitudinal de ses ancrages. Cette dernière est souvent dénommée excitation paramétrique du hauban.

ARTICLE 8.1. MODÈLE DE LA CORDE VIBRANTE

En première approche, un hauban peut être considéré comme un élément rectiligne, tendu avec une tension F , de masse linéique μ et de rigidité négligeable. Cette analyse simplifiée négligeant les effets du poids propre du hauban (effet de chaînette), aucune hypothèse n'est nécessaire sur le niveau des ancrages A et B. Ceux-ci sont fixes et distants d'une longueur l .

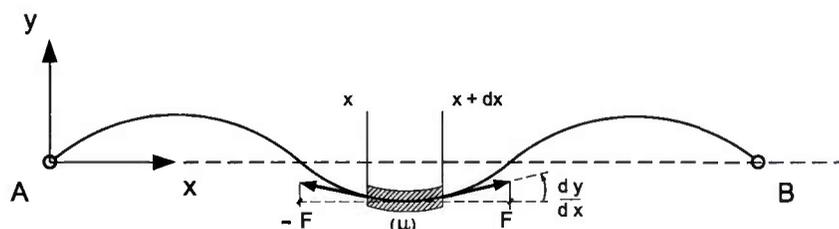


Figure 25

On étudie ici les vibrations transversales du hauban dans le repère (Axy) où x est la direction de la corde **AB** et y une direction transversale. On suppose que les vibrations sont de faible amplitude et que la tension F reste constante. Si l'on néglige l'amortissement du hauban, le déplacement transversal $y(x,t)$ est donné par l'équation fondamentale de la dynamique, appliquée à un élément infinitésimal dx :

$$\mu dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F \frac{\partial y}{\partial x}(x + dx) - F \frac{\partial y}{\partial x}(x) \quad (90)$$

soit encore

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (91)$$

en définissant la célérité des ondes transversales :

$$c = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (92)$$

L'équation se résout en cherchant $y(x,t)$ sous la forme $e(x)f(t)$, ce qui permet de séparer les variables x et t :

$$\frac{f''(t)}{f(t)} = c^2 \frac{e''(x)}{e(x)} = -\omega^2 \quad (93)$$

où ω^2 est une constante d'intégration.

En posant $k = \frac{\omega}{c}$, l'équation spatiale s'écrit

$$e''(x) + k^2 e(x) = 0 \quad (94)$$

On utilise les conditions aux limites $y(0) = y(l) = 0$, pour en déduire la forme du mode d'ordre n :

$$e_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (95)$$

et le nombre d'onde :

$$k_n = \frac{\omega_n}{c} = \frac{n\pi}{l} \quad (96)$$

L'équation temporelle s'écrit

$$f''(t) + \omega_n^2 f(t) = 0 \quad (97)$$

Elle a pour solution générale

$$f_n(t) = A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (98)$$

On retrouve bien la formule des cordes vibrantes pour la période propre T_n et la fréquence propre N_n d'ordre n :

$$\boxed{N_n = \frac{1}{T_n} = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}} \quad (99)$$

Les vibrations libres du hauban sont finalement une superposition de modes sinusoïdaux de la forme :

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \frac{n\pi x}{l} \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (100)$$

Exemple numérique

Un hauban MTP de section résistante S est constitué de torons T15 de classe $f_{rk} = 1770$ MPa. Son poids linéique est donné par $\mu = S \rho / \kappa$ où $\rho = 7850$ kg/m³ est la masse volumique de l'acier et κ est un coefficient correctif pour tenir compte de la masse de la protection anticorrosion ($k = 0,85$ pour des torons individuellement gainés protégés).

La tension de service du hauban vaut environ $F = S \gamma f_{rk}$ où γ varie entre 0,30 et 0,40.

Pour $\gamma = 0,35$, la célérité des ondes transversales vaut :

$$c = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{\gamma \kappa f_{rg}}{\rho}} = 259 \text{ m/s.}$$

Si ce hauban est fixé sur deux ancrages distants horizontalement de 200 m et verticalement de 100 m, sa pulsation fondamentale vaut $\omega_1 = 3,639 \text{ rad/s}$ et sa période fondamentale vaut $T_1 = 1,727 \text{ s}$.

ARTICLE 8.2. MODES DE VIBRATION D'UN HAUBAN PESANT

Contrairement au modèle précédent, on prend en compte dans cet article les effets du poids propre et de l'élasticité du hauban.

8.2.1. Ondes longitudinales

La tension F du hauban fluctue a priori en fonction du temps t , et de la position x le long du câble.

La variation de tension le long du câble provient pour partie des effets de poids propre (voir section 5.3.2) mais cette variation statique, limitée à quelques pour cent, est négligeable dans l'étude des vibrations. D'autre part, des ondes longitudinales de traction, ou ondes acoustiques, peuvent se développer dans le hauban et faire fluctuer la tension F le long du câble.

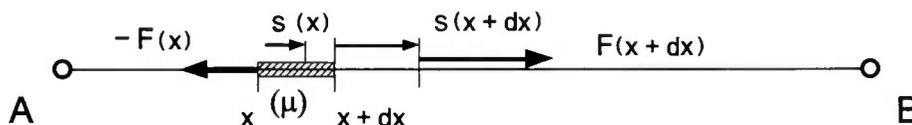


Figure 26

Soit $s(x,t)$ l'abscisse curviligne à l'instant t d'un point du câble qui se trouvait initialement à l'abscisse x . En l'absence de déplacement transversal, l'équation de la dynamique d'un élément de câble dx dans la direction longitudinale s'écrit :

$$\mu dx \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = F(x+dx) - F(x) \tag{101}$$

En utilisant la loi de Hooke

$$F(x) = ES\varepsilon = ES \left(\frac{\partial s}{\partial x} - 1 \right) \tag{102}$$

il vient finalement

$$\mu \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = ES \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} \tag{103}$$

si bien que la célérité des ondes longitudinales est

$$c_1 = \sqrt{\frac{ES}{\mu}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{104}$$

Pour des câbles en acier, le module E vaut 190 GPa environ, si bien que c_1 est de l'ordre de 5000 m/s. On a vu à l'article précédent que la célérité des ondes transversales était de l'ordre de 260 m/s. Les ondes longitudinales étant 20 fois plus rapides que les ondes transversales, il est légitime de négliger leur influence sur la tension F .

Finalement, on néglige les fluctuations spatiales de la tension conformément à l'approximation parabolique de la section 5.5.1. et l'on étudie les vibrations transversales des haubans en considérant

que F ne dépend que du temps. Plus généralement, on considère dans la suite que le déplacement longitudinal du câble (selon la corde) est négligeable devant son déplacement transversal. Cette approximation est presque toujours valable pour les haubans, dont la flèche est faible devant la portée et dont l'inclinaison α dépasse rarement 70° .

8.2.2. Mise en équation

On considère un hauban AB incliné sur l'horizontale d'un angle α . On étudie les vibrations du hauban dans le repère (Axyz) où x est la direction de la corde AB, y la direction transverse horizontale et z la direction transverse verticale orientée vers le bas. On note v et w le déplacement du point courant du hauban selon y et z à partir de la position au repos, z la flèche selon z au repos et g la constante de gravité ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Comme dans l'article précédent, l'équation de la dynamique projetée dans les directions y et z conduit aux équations du mouvement :

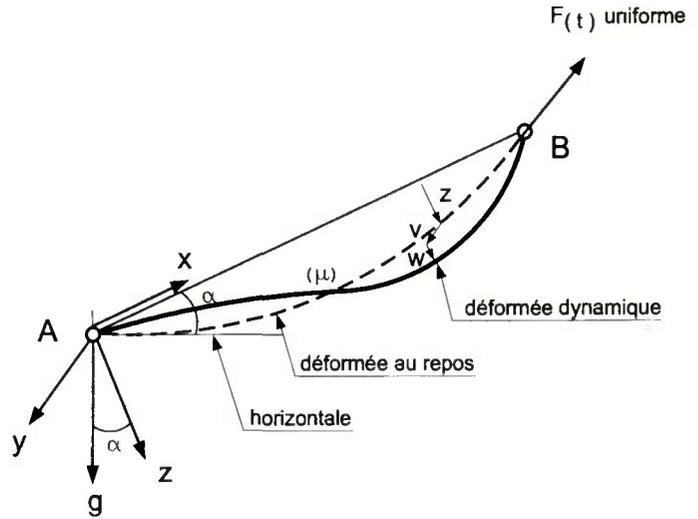


Figure 27

$$\begin{cases} \mu \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = F(t) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \\ \mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = F(t) \frac{\partial^2 (z+w)}{\partial x^2} + \mu g \cos \alpha \end{cases} \quad (105)$$

La première équation caractérise le mouvement de balancement transversal du hauban. Si l'on néglige les variations de la tension F en fonction du temps, ce balancement est découplé des oscillations du hauban dans son plan, et régi par une équation formellement identique à l'équation (91). En conclusion, un hauban vu en plan se comporte comme une corde vibrante, et possède les modes propres décrits dans l'article 8.1.

Les vibrations dans le plan vertical du hauban sont gouvernées par la seconde équation qui fait intervenir l'action de la gravité et la flèche au repos.

La tension variable $F(t)$, supposée uniforme le long du hauban, est donnée par :

$$F = F_0 + ES \frac{\Delta L}{L} = F_0 + \frac{ES}{l} \int_0^l \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\partial(z+w)}{\partial x} \right)^2} - 1 \right] dx \quad (106)$$

$$F \approx F_0 + \frac{ES}{2l} \int_0^l \left(\frac{\partial(z+w)}{\partial x} \right)^2 dx$$

où F_0 est la tension initiale du câble (au repos et en l'absence de poids propre).

La position d'équilibre z est définie par les relations :

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = - \frac{\mu g \cos \alpha}{F} \quad (107)$$

$$\underline{F} = F_0 + \frac{ES}{2l} \int_0^l \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 dx \quad (108)$$

où \underline{F} est la tension au repos du câble. Dans cette approximation, la déformée sous poids propre est bien une **parabole** (dérivée seconde uniforme).

En développant la tension $F(t)$ au premier ordre en w et moyennant une intégration par parties, on obtient :

$$F(t) \approx \underline{F} + \frac{ES \mu g \cos \alpha}{l \underline{F}} \int_0^l w dx \quad (109)$$

On peut injecter cette expression de $F(t)$ dans l'équation du mouvement (105) et développer selon les puissances successives de w considéré comme un petit déplacement. L'équation d'ordre 0 en w redonne l'équation d'équilibre (107). L'équation d'ordre 1 donne :

$$\mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \underline{F} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{ES}{l} \left(\frac{\mu g \cos \alpha}{\underline{F}} \right)^2 \int_0^l w dx \quad (110)$$

avec les conditions aux limites $w(0,t) = w(l,t) = 0$.

Comme dans l'article précédent, on recherche des solutions sous la forme $e(x)f(t)$ ce qui conduit à la séparation des variables d'espace et de temps :

$$f''(t) + \omega^2 f(t) = 0 \quad (111)$$

et

$$\begin{cases} e''(x) + k^2 e(x) = \frac{\lambda^2}{l^3} \int_0^l e(\xi) d\xi \\ e(0) = e(l) = 0 \end{cases} \quad (112)$$

où l'on a posé :

$$k^2 = \omega^2 \frac{\mu}{\underline{F}} \quad (113)$$

$$\lambda^2 = \frac{ES}{\underline{F}} \left(\frac{\mu g l \cos \alpha}{\underline{F}} \right)^2 \quad (114)$$

L'équation spatiale (112) diffère de (94) par le terme intégral qui correspond à l'augmentation de tension dans le hauban sous l'effet des oscillations. On peut distinguer deux cas :

Modes propres antisymétriques

Dans ce cas, $e(l-x) = -e(x)$. Le terme intégral est nul et les vibrations n'induisent aucune surtension du hauban. On retrouve alors des modes propres similaires à ceux de la corde vibrante :

$$e_n(x) = A_n \sin \frac{n\pi x}{l} \quad \text{avec } n = 2, 4, 6... \quad (115)$$

Modes propres symétriques

La recherche des solutions de (112) sous la forme $e(x) = A \cos kx + B \sin kx + C$ conduit à l'équation aux pulsations :

$$\tan \frac{kl}{2} = \frac{kl}{2} - \frac{4}{\lambda^2} \left(\frac{kl}{2} \right)^3 \quad (116)$$

Cette équation peut être résolue par des méthodes numériques. Elle admet une infinité dénombrable de solutions, auxquelles correspondent les déformées modales :

$$e_k(x) = C_k \left(1 - \tan \frac{kl}{2} \sin kx - \cos kx \right) \quad (117)$$

Variation temporelle

L'équation temporelle (111) conduit à la même solution générale que pour la corde vibrante :

$$f_n(t) = A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (118)$$

La pulsation temporelle s'exprime finalement à partir du nombre d'onde k_n :

$$\omega_n = k_n \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (119)$$

où $k_n = \frac{n\pi}{l}$ pour les modes antisymétriques ($n = 2, 4, 6\dots$) et k_n est solution de (116) pour les modes symétriques ($n = 1, 3, 5\dots$) Les vibrations libres du hauban sont une superposition des modes ci-dessus.

8.2.3. Allure des modes symétriques

Une manipulation trigonométrique de (117) permet de mettre en évidence le caractère symétrique de la déformée modale en l'exprimant sous la forme :

$$g_k(x) = B_k \left[\cos \left(kx - \frac{kl}{2} \right) - \cos \frac{kl}{2} \right] \quad (120)$$

avec $B_k = -C_k / \cos \frac{kl}{2}$.

Les modes propres symétriques d'un hauban pesant ont une forme de **sinusoïde décalée** par rapport à la position au repos. Ce décalage signifie que les noeuds du mode propre sont distants de deux longueurs d'onde différentes, et que l'amplitude des ventres de vibration présente deux

valeurs différentes $|B_k|(1 - \cos \frac{kl}{2})$ et $|B_k|(1 + \cos \frac{kl}{2})$.

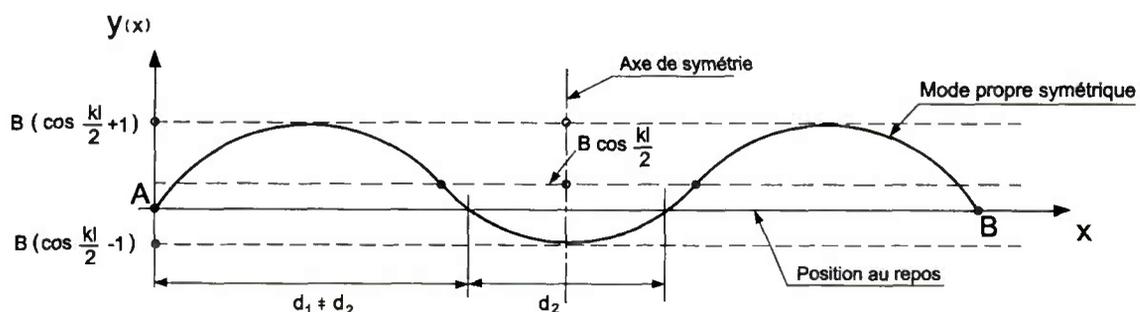


Figure 28

Les solutions de l'équation (116) sont toutes de la forme

$$k_n l = n\pi(1 + \varepsilon_n) \quad \text{avec } n = 1, 3, 5... \text{ et } 0 < \varepsilon_n < 2/n \quad (121)$$

où ε_n est le décalage relatif entre le nombre d'onde ou la pulsation d'ordre n de la corde vibrante et ceux du hauban pesant :

$$\varepsilon_n = \frac{k_n - n\pi/l}{n\pi/l} \quad (122)$$

La référence [18] fournit une étude complète de ces solutions et de la forme des modes propres associés, en fonction du paramètre adimensionnel λ^2 . Ce paramètre λ^2 , parfois appelé paramètre d'Irvine, caractérise le rapport des effets de grands déplacements (changement de géométrie du câble) sur les effets d'élasticité dans la vibration des câbles pesants.

Exemple numérique

Le paramètre λ^2 peut prendre des valeurs élevées pour les câbles ayant une flèche importante, tels que les câbles porteurs de ponts suspendus. Il est intéressant de connaître les ordres de grandeur pour un hauban de pont en service.

On reprend l'exemple précédent : $\mu = S \rho / \kappa$ et $E = S \gamma f_{rg}$ avec κ de l'ordre de 0,85 et γ de l'ordre de 0,35 pour la tension permanente en service. Les torons sont de classe $f_{rg} = 1770$ MPa, $\cos \alpha$ est inférieur à 1 et g vaut environ 10 m/s².

$$\text{Alors } \lambda^2 = \frac{E \rho^2 g^2 l^2 \cos^2 \alpha}{\gamma^3 \kappa^2 f_{rg}^3} < \left(\frac{l}{383} \right)^2$$

On voit donc que pour des haubans de longueur courante, c'est-à-dire inférieure à 200 m, la valeur de λ^2 est petite devant 1 pour la tension en service. Pour un hauban fixé sur deux ancrages distants horizontalement de 200 m et verticalement de 100 m, $\lambda^2 = 0,068$.

En revanche, ce n'est plus le cas pour des haubans de très grande portée, ou bien en phase de construction. Par exemple, si chaque toron du hauban précédent était tendu avec un effort de 10 kN, alors $\lambda^2 = 54,7$.

On peut noter les propriétés suivantes sur l'allure des modes symétriques :

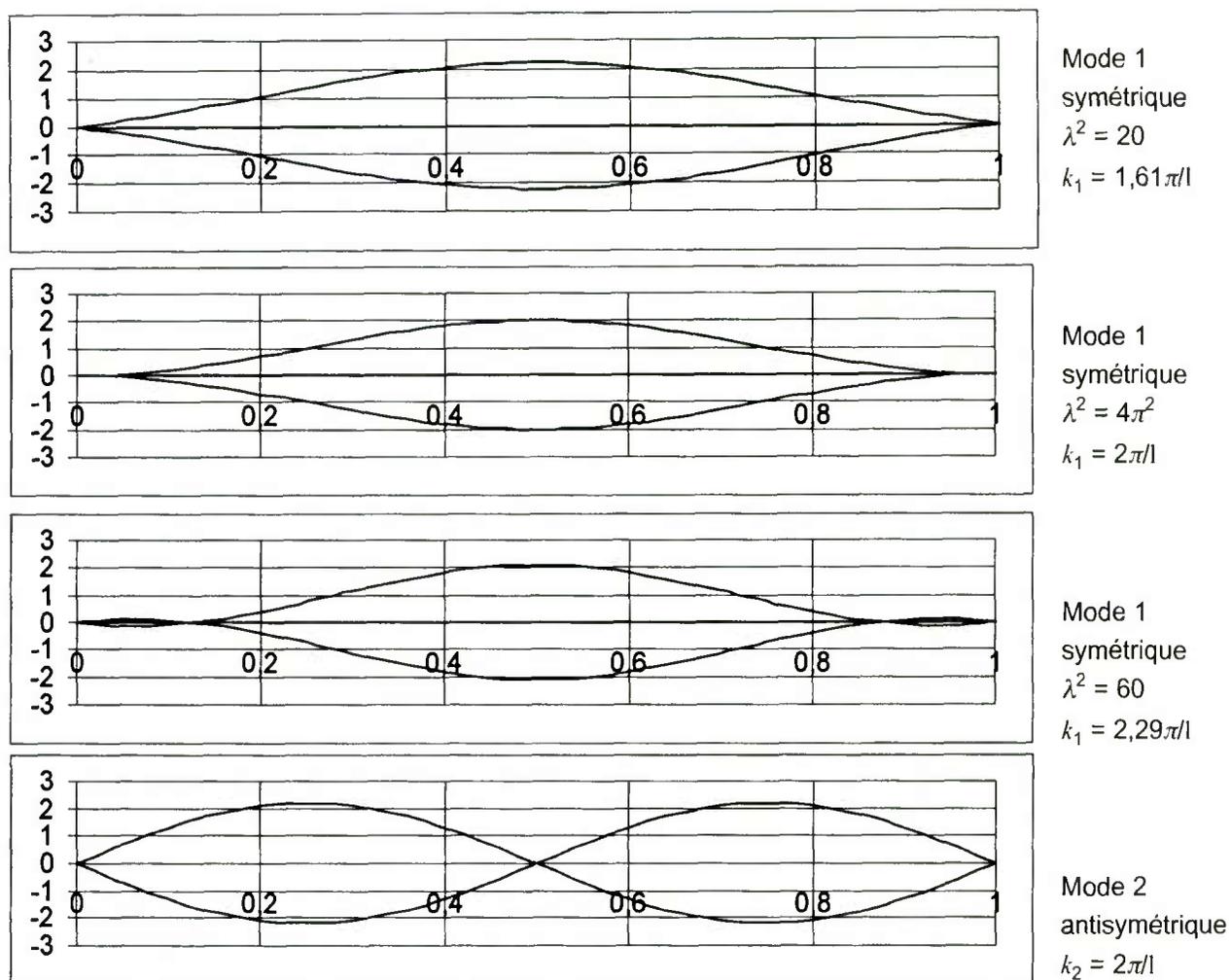
- Lorsque λ^2 est petit, ε_n tend vers zéro et le mode propre symétrique d'ordre n est une sinusoïde à n ventres, ceux-ci ayant deux amplitudes différentes.
- Si λ^2 augmente progressivement, cette sinusoïde se décale de plus en plus, jusqu'à être tangente à la position d'équilibre pour une valeur critique de λ^2 telle que $k_n = (n+1)\pi/l$ et le

décalage $\left| \cos \frac{k_n l}{2} \right|$ soit égal à 1. Le nombre d'onde du mode symétrique est alors identique

à celui du mode antisymétrique immédiatement voisin.

- Puis, λ^2 continuant d'augmenter, le décalage de la sinusoïde décroît à nouveau, mais deux ventres supplémentaires apparaissent à proximité des ancrages. Le mode symétrique d'ordre n présente alors $n+2$ ventres.

Le premier mode est le plus important en pratique. Les graphes ci-dessous représentent, avec une amplitude arbitraire, l'allure du premier mode symétrique pour trois valeurs de λ^2 ainsi que le premier mode antisymétrique. A partir de la valeur critique $\lambda^2 = 4\pi^2$, ce premier mode présente un nœud interne, et le nombre d'onde du premier mode symétrique devient supérieur à celui du premier mode antisymétrique, ce dernier étant constant égal à $2\pi/l$.



Graphique 6

8.2.4. Approche énergétique

L'article 8.2.2. aborde la vibration du hauban pesant par une méthode analytique. Une approche énergétique permet de confirmer ces résultats, et donne des formules approchées intéressantes.

L'énergie totale du hauban en vibration dans son plan vertical est la somme de trois termes :

- E_c : énergie cinétique ;
- E_p : énergie potentielle liée au champ de pesanteur ;
- E_e : énergie élastique emmagasinée dans le hauban.

En utilisant les notations des sections précédentes, ces termes s'expriment comme suit :

$$E_c = \frac{\mu}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial(z+w)}{\partial t} \right)^2 dx \quad (123)$$

$$E_p = -\mu g \cos \alpha \int_0^l (z+w) dx \quad (124)$$

$$E_e = \frac{l}{2ES} F^2(t) \quad (125)$$

La fluctuation $w(t)$ étant considérée comme une petite déformée par rapport à la déformée au repos, on peut calculer la tension $F(t)$ comme dans l'équation (106), mais cette fois en conservant les termes d'ordre 2 en w :

$$F(t) \approx \underline{F} - \frac{ES}{l} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \int_0^l w dx + \frac{1}{2} \frac{ES}{l} \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \quad (126)$$

où \underline{F} est la tension au repos du câble.

En regroupant, on obtient l'expression de l'énergie totale ci-dessous :

$$E = E_c + E_p + E_e = \frac{l}{2ES} \underline{F}^2 - \mu g \cos \alpha \int_0^l z dx - \left[\underline{F} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \mu g \cos \alpha \right] \int_0^l w dx + \left[\frac{\mu}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx + \frac{ES}{2l} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right)^2 \left(\int_0^l w dx \right)^2 + \frac{\underline{F}}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \right] \quad (127)$$

Le terme d'ordre 0 en w est lié à la définition d'une énergie de référence. Par conservation de l'énergie totale, les termes d'ordre 1 et 2 en w doivent être indépendants du temps. Pour le terme d'ordre 1, on retrouve l'équation d'équilibre (107). Pour le terme d'ordre 2, on obtient l'équation suivante :

$$\mu \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx + \frac{ES}{l} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right)^2 \left(\int_0^l w dx \right)^2 + \underline{F} \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx = K \quad (128)$$

Cette équation se résout par analyse modale. En recherchant des solutions de la forme $g(x) = A \cos kx + B \sin kx + C$ on aboutit, par des calculs un peu fastidieux, à l'équation transcendante (116). L'approche énergétique confirme bien la méthode analytique.

De manière approchée, on peut également résoudre (128) avec les modes de la corde vibrante

$$w_n(x) = A_n \sin \frac{n\pi x}{l} \cos \omega t \quad (129)$$

Tous calculs faits, on aboutit à l'équation :

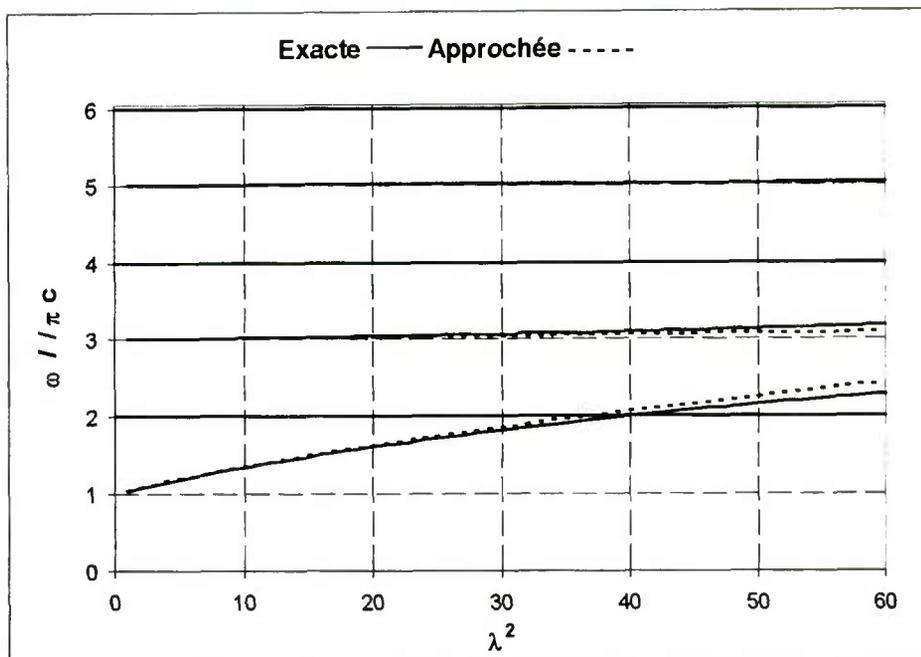
$$\frac{\mu \omega^2}{2} A_n^2 \sin^2 \omega t + \left[\frac{4EA}{l} \left(\frac{\mu g l \cos \alpha}{n\pi \underline{F}} \right)^2 \zeta(n) + \frac{\underline{F}}{2} \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \right] A_n^2 \cos^2 \omega t = K \quad (130)$$

en notant $\zeta(n)$ la fonction de n valant 1 si n est impair et 0 sinon. L'expression ci-dessus est constante si et seulement si les coefficients de $\sin \omega t$ et $\cos \omega t$ sont égaux. On en déduit une valeur approchée des pulsations propres :

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{\underline{F}}{\mu}} \quad \text{pour } n = 2, 4, 6... \quad (131)$$

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{\underline{F}}{\mu} \sqrt{1 + \frac{8\lambda^2}{(n\pi)^4}}} \quad \text{pour } n = 1, 3, 5... \quad (132)$$

où λ^2 est le paramètre adimensionnel défini en (114).



Graphique 7 : pulsation réduite $\omega l / \pi c$ pour les six premiers modes propres, en fonction du paramètre adimensionnel λ^2

Pour les modes symétriques ($n = 1, 3, 5\dots$) cette expression de la pulsation est approchée. Le terme correctif $\frac{8\lambda^2}{(n\pi)^4}$ tend bien vers 0 si λ^2 est petit et l'on retrouve alors l'approximation de la corde vibrante.

Pour les petites valeurs de λ^2 , en identifiant avec l'équation (121) on obtient une expression approchée du décalage relatif ε_n par rapport à la corde vibrante :

$$\varepsilon_n \approx \frac{4\lambda^2}{(n\pi)^4} \quad (133)$$

Le graphique 7 ci-dessus représente la valeur exacte, obtenue par méthode numérique, et l'expression approchée (132) de la pulsation réduite $\omega_n l / \pi c$ pour les six premiers modes propres d'un hauban.

Exemple numérique

Pour le hauban de l'exemple précédent, tendu à $0,35 f_{rg}$, $\lambda^2 = 0,068$.

Le décalage relatif entre la pulsation de la corde vibrante et celle du hauban réel est $\varepsilon_1 = 0,28 \%$ en valeur exacte ou approchée par (133). **Le modèle de la corde vibrante donne une très bonne approximation des pulsations et nombres d'onde pour les haubans en service.**

Si les torons de ce hauban sont tendus chacun à 10 kN, $\lambda^2 = 54,7$.

La pulsation réduite $\omega_1 l / \pi c$ vaut alors 2,23 soit un écart de 123 % avec la valeur 1 de la corde vibrante. La valeur approchée donnée par la formule (132) est 2,34 soit une approximation de la valeur exacte à 5 % environ. Cette formule est donc utilisable pour calculer les pulsations et nombres d'onde des haubans réels peu tendus.

ARTICLE 8.3. EXCITATION PAR LE DÉPLACEMENT TRANSVERSAL D'UN ANCRAGE

L'analyse dynamique d'un ouvrage haubané sépare généralement le comportement vibratoire du pont et celui des câbles ; ce dernier est décrit dans les articles précédents. Cette décomposition découle des limitations actuelles en capacité de calcul, ainsi que de l'hypothèse d'une séparation entre le comportement dynamique global de la structure et les vibrations locales des câbles. L'hypothèse de séparation est généralement satisfaite, sauf pour les phénomènes de couplage entre structure et haubannage.

Ces phénomènes de couplage concernent l'excitation d'un hauban par le déplacement périodique de ses ancrages, déplacement lié aux charges de trafic ou à l'action du vent sur la structure. On va préciser dans le présent article et le suivant la réponse d'un hauban au déplacement transversal ou longitudinal d'un de ses ancrages, souvent appelée excitation paramétrique. Le cas général d'un déplacement quelconque des ancrages se ramène à ces deux exemples élémentaires par projection.

8.3.1. Mise en équation

On étudie la réponse d'un hauban à une excitation de son extrémité B animée d'un mouvement transversal périodique de pulsation Ω , l'extrémité A restant fixe :

$$y_B(t) = Y \cos \Omega t \quad (134)$$

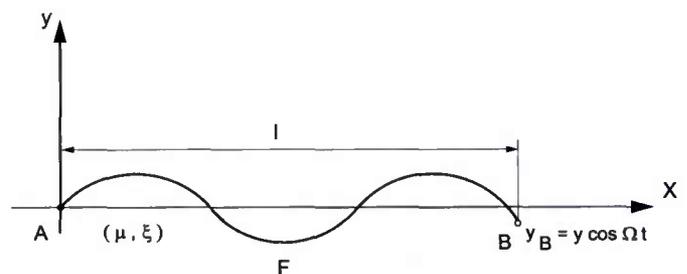


Figure 29

Dans le présent article, on néglige l'effet de chaînette et l'on se place dans le cadre du modèle de la corde vibrante décrit à l'article 8.1. en y ajoutant un amortissement visqueux de constante γ . Si de plus on néglige le déplacement longitudinal du hauban et les variations de tension F , le mouvement transversal $y(x,t)$ est donné par l'équation fondamentale de la dynamique :

$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \gamma \frac{\partial y}{\partial t} \quad (135)$$

avec les conditions aux limites

$$y(0,t) = 0, \quad y(l,t) = y_B(t) \quad (136)$$

Considérant que l'on est en régime harmonique forcé, on cherche des solutions complexes de la forme $y(x,t) = \text{Re}\{e(x)f(t)\}$ avec $f(t) = \exp(j\Omega t)$ où $j = \sqrt{-1}$. Cela permet de séparer les variables x et t comme à l'article 8.1. :

$$\frac{f''(t) + \frac{\gamma}{\mu} f'(t)}{f(t)} = c^2 \frac{e''(x)}{e(x)} = -\omega^2 \quad (137)$$

où c est la célérité des ondes transversales et ω^2 une constante complexe d'intégration. De l'équation temporelle, on tire la relation

$$\omega^2 = \Omega^2 \left(1 - \frac{j\gamma}{\mu\Omega} \right) \quad (138)$$

En posant $k = \frac{\omega}{c}$, l'équation spatiale s'écrit

$$e''(x) + k^2 e(x) = 0 \quad (139)$$

Soit $(a+jb)$ une racine carrée complexe de $\left(1 - \frac{j\gamma}{\mu\Omega}\right)$, alors $k = \frac{\Omega}{c}(a + jb)$. La solution de l'équation spatiale vérifiant les conditions aux limites $e(0) = 0$ et $e(l) = Y$ s'écrit formellement :

$$e(x) = A \sin\left[\frac{\Omega}{c}(a + jb)x\right] \quad (140)$$

C'est une sinusoïde d'amplitude complexe A :

$$A = \frac{Y}{\sin\left[\frac{\Omega}{c}(a + jb)l\right]} \quad (141)$$

8.3.2. Cas d'un hauban réel

Le fait que l'amplitude A ne soit pas un nombre réel, témoigne d'un déphasage entre l'excitation et la réponse, lié à l'amortissement visqueux γ du hauban. Cet amortissement étant généralement très petit devant l'unité pour un hauban réel, on a :

$$a \approx 1, \quad b \approx -\frac{\gamma}{2\mu\Omega} \quad (142)$$

Quelques manipulations trigonométriques donnent alors l'amplitude approchée de la réponse :

$$|A| \approx \frac{Y}{\sqrt{\sin^2 \pi r + \xi^2 \pi^2 \cos^2 \pi r}} \quad (143)$$

où r désigne le rapport de la fréquence d'excitation à la fréquence fondamentale du hauban :

$$r = \frac{\Omega}{\omega_1} \quad \text{avec} \quad \omega_1 = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (144)$$

et ξ désigne l'amortissement rapporté au critique :

$$\xi = \frac{\gamma}{2\mu\omega_1} \quad (145)$$

La réponse d'un hauban excité par le mouvement périodique d'un de ses ancrages est donc une oscillation de même pulsation Ω et de déformée modale sinusoïdale. Lorsque la pulsation d'excitation est un multiple entier de la pulsation fondamentale du hauban (r est un entier), il y a résonance et l'amplitude de la réponse vaut :

$$|A| = \frac{2}{\delta} Y \quad (146)$$

où δ est le décrément logarithmique du hauban. On rappelle que $\delta = 2\pi\xi$.

A la résonance, l'amplitude d'oscillation d'un hauban est considérablement plus grande que celle de l'excitation par les ancrages, et croîtrait indéfiniment si le hauban n'était pas amorti. Si les deux ancrages oscillaient en phase avec la même pulsation, on obtiendrait une amplitude double, par superposition. La prise en compte de l'effet de chaînette ne changerait pas sensiblement ces résultats. On montrerait également que, hors du pic de résonance, l'augmentation de l'amortissement des haubans est inefficace pour limiter l'amplitude des vibrations [26].

Exemple numérique

Le décrétement logarithmique d'un hauban sans amortisseur externe est généralement proche de 1 % (voir 4.1.2.)

L'amplitude de vibration Y d'un tablier de pont haubané de moyenne portée est souvent de l'ordre de quelques centimètres sous un vent extrême (premiers modes de flexion verticale). Si la pulsation d'un de ces modes est un multiple entier de la pulsation fondamentale d'un hauban, celui-ci peut vibrer avec une amplitude de $200 Y$ soit quelques mètres.

ARTICLE 8.4. EXCITATION PARAMÉTRIQUE PAR UN DÉPLACEMENT LONGITUDINAL

8.4.1. Mise en équation simplifiée

On étudie la réponse d'un hauban à une excitation de son extrémité B animée d'un mouvement longitudinal périodique de pulsation Ω , l'extrémité A restant fixe :

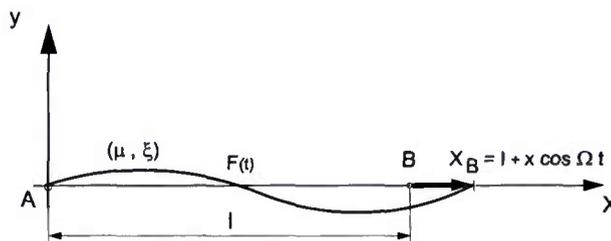


Figure 30

$$x_B(t) = X \cos \Omega t \quad (147)$$

Contrairement à l'article précédent, on ne peut pas négliger les déplacements longitudinaux du hauban, qui induisent une variation de sa tension F . Cependant, compte tenu de la célérité des ondes acoustiques dans le hauban, on peut considérer que la tension est à tout moment uniforme (voir 8.2.1.)

Dans un premier temps, on néglige également l'effet de chaînette et considère que les oscillations sont de faible amplitude devant X . L'allongement du câble est quasiment égal à $x_B(t)$ et la tension vaut à tout instant :

$$F(t) = \underline{F} + \frac{ES}{l} x_B(t) \quad (148)$$

où \underline{F} est la tension du hauban au repos et ES est sa rigidité axiale.

On prend également en compte un amortissement visqueux de constante γ . Le mouvement transversal $y(x,t)$ est alors donné par l'équation fondamentale de la dynamique :

$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F(t) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \gamma \frac{\partial y}{\partial t} \quad (149)$$

avec les conditions aux limites

$$y(0,t) = y(l,t) = 0 \quad (150)$$

Cette équation se résout encore en recherchant des solutions de la forme $y(t) = e(x)f(t)$ et l'on aboutit à l'équation temporelle :

$$f''(t) + 2\omega_1 \xi f'(t) + \omega_n^2 [1 + 2a(\cos \Omega t)] f(t) = 0 \quad (151)$$

où n est le mode propre du hauban excité (généralement le premier) et l'on conserve les notations :

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{\underline{F}}{\mu}}$$

$$\xi = \frac{\gamma}{2\mu\omega_1}$$

et l'on a posé :

$$a = \frac{ESX}{2Fl} \quad (152)$$

L'équation (151) est une équation de Mathieu-Hill, dont l'étude des solutions est donnée par la littérature (voir [7, 12]). Elle fait apparaître deux types de comportements vibratoires : mouvement amorti ou mouvement divergent dont l'amplitude croît exponentiellement avec le temps. Le cas de divergence (instabilité) est appelé **résonance paramétrique**.

L'étude de la résonance paramétrique est généralement effectuée dans le plan (Ω, a) où l'on définit les zones d'instabilité, séparés du domaine de stabilité par des frontières représentatives de réponses périodiques. On montre qu'il existe une infinité dénombrable de zones d'instabilité, correspondant à des pulsations d'excitation Ω proches de $2\omega_n/k$, $k = 1, 2, \dots$

Les deux premières zones sont de loin les plus importantes (les autres étant plus aplaties) et leurs limites sont données par les équations :

Zone 1 :

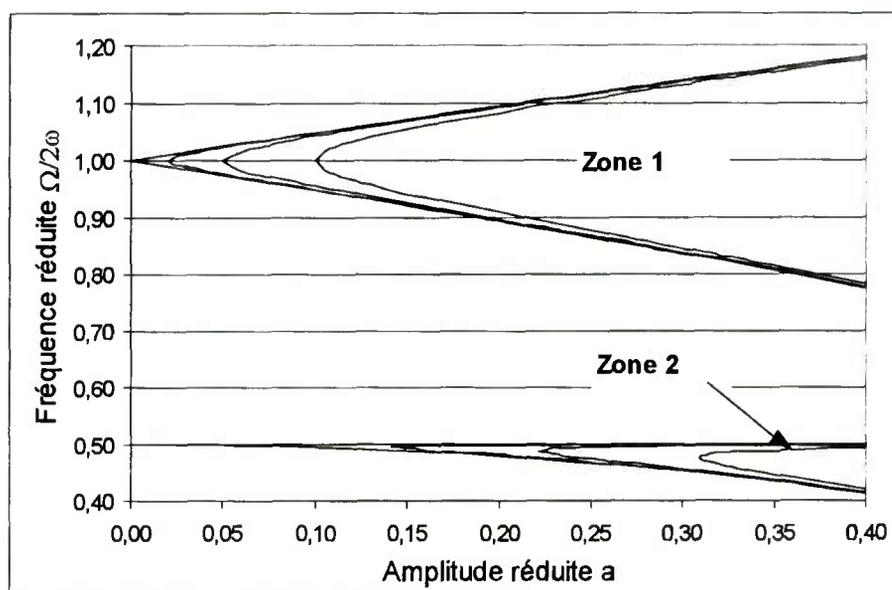
$$\Omega = 2\omega_n \sqrt{1 \pm \sqrt{a^2 - \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2}} \quad (153)$$

Zone 2 :

$$\Omega = \omega_n \sqrt{1 - a^2 \pm \sqrt{a^4 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 (a^2 - 1)}} \quad (154)$$

où δ est le décrement logarithmique du hauban. On a représenté ces zones sur le graphique 8 ci-dessous, pour différentes valeurs d'amortissement.

On s'aperçoit que la résonance n'est possible que pour une amplitude a supérieure à un seuil, égale à δ/π pour la première zone. On peut montrer que pour une résonance au voisinage de la pulsation $2\omega_n/k$ la valeur du seuil est proportionnelle à $\delta^{1/k}$. L'augmentation de l'amortissement des haubans permet donc de retarder le phénomène de résonance paramétrique, comme le montre le graphique ci-dessous.



Graphique 8 : zones d'instabilité 1 et 2 d'un hauban, pour un amortissement rapporté au critique de 0%, 1%, 2,5% et 5%

8.4.2. Etude détaillée de l'excitation paramétrique

La modélisation précédente conduit à des vibrations d'amplitude non bornée en cas de résonance. Elle a été obtenue en négligeant de nombreux termes, et notamment en considérant que les oscillations sont de faible amplitude devant X. Cela n'est manifestement pas vérifié en cas de résonance paramétrique.

Des modélisations plus appropriées ont été proposées par Pinto da Costa et Lilien [20] d'une part, et plus récemment par Clément et Crémona [7] du LCPC. Elles se limitent à l'étude du mode fondamental du hauban (n = 1).

Pour un hauban incliné d'un angle α sur l'horizontale, la prise en compte de l'effet de chaînette, d'un terme de force lié au déplacement périodique de l'ancrage B, et de termes non linéaires conduit à remplacer l'équation (151) par l'équation différentielle suivante :

$$f''(t) + 2\omega_1 \xi f'(t) + \omega_1^2 [1 + 2a(\cos \Omega t)] f(t) + c_3 f^2(t) + c_5 f^3(t) = Q \cos(\Omega t) \quad (155)$$

où

$$c_3 = 3\pi \frac{ESg}{Fl} \cos \alpha$$

$$c_5 = \frac{\pi^2 ES}{4 F} \omega_1^2$$

$$Q = -\frac{2 ES Xg}{\pi F l^2} \cos \alpha$$

L'étude des solutions de cette équation conduit à des zones d'instabilité similaires à celles de l'équation de Mathieu-Hill, données à la section précédente. L'amplitude de la réponse reste toujours bornée, contrairement à ce que concluait la section précédente.

Dans la zone d'instabilité 1, la réponse vibratoire du hauban a une pulsation de $\Omega/2$. On peut établir l'expression analytique de l'amplitude limite de cette réponse :

$$A = 2\omega_1 \sqrt{\frac{r^2 - 1 + \sqrt{a^2 - \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 r^2}}{3c_5}} \quad (156)$$

où r est le rapport des fréquences :

$$r = \frac{\Omega}{2\omega_1}$$

Hors de la zone d'instabilité 1, c'est-à-dire dans le domaine de stabilité et dans la zone 2, la réponse vibratoire du hauban a une pulsation Ω . Lorsque le coefficient c_5 est petit, une expression approchée de l'amplitude limite de cette réponse est :

$$A = \frac{Q}{\omega_1^2 (1 - r^2 - 2a^2)} \quad (157)$$

où r est cette fois le rapport :

$$r = \frac{\Omega}{\omega_1}$$

L'amortissement δ intervient bien dans le seuil de déclenchement de la résonance paramétrique, mais il a un effet négligeable sur la valeur de l'amplitude limite.

En conclusion, agir sur l'amortissement d'un hauban pour lequel $\Omega \approx 2\omega_n$ ($n = 1,2,\dots$) permet seulement de retarder l'apparition de la résonance paramétrique, mais n'en limite pas les effets. Il est donc nécessaire d'agir sur le rapport des fréquences Ω et ω_n pour combattre efficacement la résonance paramétrique.

DEUXIÈME PARTIE :
TECHNOLOGIE DES PROCÉDÉS DE HAUBANAGE

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 9. PARTIE COURANTE

Les câbles de haubans sont constitués de diverses armatures en acier. On peut distinguer trois catégories de haubans, en fonction des armatures élémentaires utilisées (fils ou torons) :

Abréviation	Désignation	Armatures en acier revêtu
MTP	Multi-torons parallèles	Torons de précontrainte T15,2 ou T15,7 gainés individuellement et/ou collectivement
MFP	Multi-fils parallèles	Fils ronds boutonnés gainés collectivement
TMC	Toron multi-couches	Fils ronds et/ou fils profilés

Le présent chapitre indique d'abord des prescriptions générales sur la partie courante des haubans, et notamment leur protection anti-corrosion, puis fixe des prescriptions de détail pour chacune des trois catégories ci-dessus.

ARTICLE 9.1. DISPOSITIONS GÉNÉRALES COMMUNES

9.1.1. Principes de protection des haubans

Les réflexions sur la durabilité exposées au chapitre 3. conduisent à protéger les haubans contre l'usure et la corrosion des armatures. Ces protections doivent garantir une durée de vie suffisante au hauban, avant qu'un remplacement des armatures ne soit nécessaire.

Cette durée de vie peut être plus ou moins longue en fonction des spécifications du projet, mais compte tenu des conditions économiques rencontrées habituellement, une durée de vie de 30 ans moyennant maintenance paraît un strict minimum avant le remplacement d'un hauban. Le projet peut en outre spécifier des durées minimales sans aucune intervention d'entretien sur le hauban (voir chapitres 3. et 13.)

9.1.1.1. Disposition anti-usure

L'interposition d'un isolant mécanique ou d'un lubrifiant entre les pièces d'acier en contact doit prévenir les phénomènes UIP et FIP dans les armatures de haubans, en zone courante, en zone d'ancrage ainsi qu'en tout point singulier.

Les armatures élémentaires constituant les haubans peuvent être en contact entre elles et avec d'autres pièces métalliques : ces contacts peuvent se produire en zone courante (contact entre fils élémentaires) et dans les zones d'ancrage ou d'attaches sur le hauban.

Sous l'effet de petits débattements fréquents, ces contacts finissent par causer une perte de matière des armatures par création et évacuation d'oxydes pulvérulents. Les effets de ces phénomènes sont une usure (dite usure induite par petits débattements, UIP) et une fissuration de fatigue (dite fatigue induite par petits débattements, FIP) qui doivent être prévenues par l'interposition d'une interface isolant mécaniquement ou lubrifiant le contact entre les pièces métalliques concernées [3].

9.1.1.2. Redondance des barrières anti-corrosion

La protection anti-corrosion des armatures en acier des haubans doit être assurée de façon redondante par deux barrières complémentaires :

1. La première barrière (ou barrière interne) est une protection au contact de l'armature, qui doit régner sans discontinuité sur toute la longueur du câble.
2. La seconde barrière (ou barrière externe) est constituée d'une enceinte externe et d'un milieu intermédiaire, compris entre l'enceinte externe et la barrière interne. Pour éviter la consommation de la première barrière, l'enceinte externe doit être étanche, en zone courante comme en zone d'ancrage. De plus, le milieu intermédiaire, doit empêcher la circulation d'humidité ou d'eau au contact de la première barrière.

Comme on le verra ci-après la première protection joue un rôle sacrificiel (ou consommable), c'est à dire qu'elle peut être consommée chimiquement au cours de la vie du hauban, évitant ainsi l'oxydation directe de l'acier. Cette réaction chimique consomme le matériau protecteur, qui ne joue plus son rôle quand il est épuisé. La seconde barrière est donc indispensable, pour éviter un épuisement prématuré de la protection de contact des armatures.

D'autre part, la barrière externe est exposée aux agressions environnementales, et peut être endommagée par des actes de vandalisme, par vieillissement, etc. En pratique, un endommagement local de cette barrière est souvent détecté et réparé seulement après plusieurs mois ou années. Cet endommagement ne doit pas exposer directement les armatures résistantes aux agressions environnementales, ce qui justifie la première barrière.

*La redondance des barrières n'est efficace que si la conception du système empêche la **circulation** d'humidité entre les deux barrières, pour éviter le lessivage d'éventuels produits de corrosion ou de mettre en relation des défauts locaux de chaque barrière. Une simple enceinte, par exemple une gaine en PEHD entourant les armatures sans produit de colmatage, ne constitue pas une barrière externe efficace, car elle n'empêche pas la circulation d'eau ou d'humidité au contact de la barrière interne.*

9.1.1.3. Continuité des barrières anti-corrosion

La continuité des deux barrières de protection anti-corrosion définies ci-dessus doit être assurée sur toute la longueur du hauban, et en particulier dans la totalité de la zone d'ancrage (voir section 10.2.3).

9.1.2. Première barrière

En l'état actuel des connaissances, les principes de protection exposés ci-dessus conduisent à employer une première barrière métallique sacrificielle, de type galvanisation, décrite en 9.1.2.1. Une barrière interne d'une autre nature pourra toutefois être employée, dans les conditions du paragraphe 9.1.2.2. L'obligation de prévoir une première barrière par galvanisation ou par un revêtement de propriétés équivalentes exclut, en haubanage définitif, l'emploi d'armatures claires ou protégées par les revêtements évoqués au paragraphe 9.1.2.3.

Dans la plupart des cas, la première barrière doit répondre simultanément aux exigences de protection anti-corrosion et contre l'usure de contact. L'expérience industrielle de la galvanisation démontre le rôle favorable du zinc, non seulement comme protection sacrificielle contre la corrosion chimique, mais aussi comme interface de contact dont les produits d'usure n'ont pas les désagréments de la rouille du contact acier/acier.

*En fonction de la durée d'utilisation et de l'agressivité du milieu, pour les haubans **provisoires** on peut recourir à des armatures claires ou protégées par les revêtements évoqués au paragraphe 9.1.2.3.*

9.1.2.1. Protection par revêtement métallique

La première barrière est un revêtement métallique, en contact intime avec l'acier de l'armature, conformément aux normes NF A 35-035 (révision 2000) ou NF XPA 35-036. Ce revêtement est généralement composé :

- soit, de zinc pur (galvanisation) ;
- soit, d'un alliage zinc-aluminium, parfois dénommé galfan, composé de 95 % de zinc et de 5 % d'aluminium (galfanisation).

La qualité et la durée de cette première protection dépendent de la nature et de l'épaisseur de ce revêtement métallique.

Les propriétés de cicatrisation de la protection galvanique sont remarquables : le zinc forme des couches d'alliage avec l'acier de surface, et a tendance à migrer vers les zones d'acier non revêtues.

En zone courante du câble, la protection par un alliage zinc-aluminium semble plus efficace que la protection plus classique par galvanisation (zinc seul), mais on dispose d'une expérience plus limitée sur l'interaction de cet alliage avec les pièces d'ancrages.

Le choix de l'épaisseur de revêtement métallique doit notamment être guidé par les critères suivants :

- prévoir une épaisseur suffisante pour allonger la durée de vie de la protection sacrificielle ;
- respecter les limites technologiques de l'interface acier/revêtement métallique protecteur (adhérence, continuité, ductilité, etc.) ;
- pour les haubans à torons ancrés par clavettes, éviter une épaisseur trop importante qui risquerait de "gaver" les dents des clavettes lors du défilement de mise en tension avec un équipement dont le guidage serait insuffisant ;
- pour les torons multi-couches à fils profilés (câbles clos), respecter des tolérances dimensionnelles permettant un bon emboîtement des fils ;
- pour les torons multi-couches à fils ronds, s'assurer que le revêtement métallique ne compromet pas la résistance mécanique des fils et n'oblige pas à utiliser des fils clairs de résistance beaucoup plus élevée que celle du fil terminé.

Des indications sur les épaisseurs de revêtement sont données dans la suite, pour chaque procédé de haubanage.

Le revêtement métallique de protection doit obligatoirement être appliqué sur les fils individuels au cours de leur fabrication.

Le revêtement métallique (zinc ou zinc + aluminium) est appliqué chez les tréfileurs qui fournissent les fils élémentaires, préalablement à tout toronnage. Il est bien connu que le processus de galvanisation conduit à une certaine perte de limite élastique. Cette perte est toutefois compensée par le retréfilage ultérieur avant toronnage, excepté pour les revêtements de classe A des fils composant les TMC qui sont galvanisés en phase finale (voir 9.4.1).

9.1.2.2. Protection non métallique équivalente à la galvanisation

Alternativement à un revêtement métallique de type galvanisation, un revêtement protecteur par des matériaux nouveaux peut être employé, sous réserve de démontrer un niveau de performance équivalent à la galvanisation pour les propriétés suivantes :

- continuité et adhérence au support sous l'effet des sollicitations statiques (flexion) et dynamiques en service ;
- lubrification des contacts pour prévenir les phénomènes UIP et FIP ;
- protection anti-corrosion.

9.1.2.3. Autres protections non métalliques

Si l'efficacité de ces protections n'est pas avérée de façon durable, un revêtement métallique doit leur être préféré.

Les torons revêtus de résine époxy, n'ont pas trouvé l'essor espéré. Des problèmes de tenue en fatigue ont été mis en évidence, liés directement aux effets UIP et FIP dus à un défaut d'adhérence et à une fissuration prématurée du revêtement. Même si les connaissances doivent encore progresser, ces produits ne paraissent pas promis à un développement significatif.

L'huile, soluble dans l'eau, employée pour la protection des torons clairs utilisés pour les haubans provisoires, exige un renouvellement régulier.

9.1.3. Seconde barrière

La seconde barrière anti-corrosion peut prendre des formes très variées selon la catégorie des haubans et les prescriptions particulières propres à l'ouvrage. Elle est habituellement conçue et mise en œuvre par le détenteur du procédé de haubanage qui doit définir dans la notice technique de son procédé :

- la nature de la seconde barrière en zone courante du hauban (enceinte externe et milieu intermédiaire) ;
- les dispositifs assurant la continuité de cette barrière dans la totalité de la zone d'ancrage.

9.1.3.1. Enceinte externe étanche

En partie courante du hauban, cette enceinte est habituellement constituée par une gaine de l'une des catégories suivantes :

- gaine collective en matière plastique formée de tubes, de type polyoléfine, polyéthylène à haute densité (PEHD) ou similaire ;
- gaine individuelle en matière plastique extrudée directement sur les torons individuels, pour les haubans multi-torons individuellement protégés, ou sur le câble monotoron des haubans TMC ;
- gaine collective métallique formée de tubes assemblés bout à bout, protégés contre la corrosion ou inoxydables.

Même si elle ne constitue pas une enceinte à proprement parler, la protection externe par peinture ou revêtement époxy des haubans à toron multi-couches peut être envisagée. Elle nécessite toutefois un entretien périodique contraignant, comme indiqué en section 9.4.3.

L'enroulage d'une bande adhésive autour d'un hauban ne constitue pas une enceinte externe étanche, en l'état actuel de la technique. Cette bande peut toutefois avoir d'autres fonctions que la protection anti-corrosion.

Quand la deuxième barrière anti-corrosion consiste en une enceinte collective du hauban, celle-ci peut remplir d'autres fonctions, et notamment :

- mécaniques (limitations de la traînée du hauban ou du battement des armatures individuelles) ;
- aérodynamiques (limitation de l'instabilité pluie + vent) ;
- esthétiques (couleur).

Inversement, on peut être amené à prévoir une enveloppe collective, éventuellement non étanche, autour d'un hauban formé de torons individuellement protégés, pour remplir ces fonctions complémentaires. Ces gaines collectives sont décrites plus précisément à l'article 9.5. Si cette enceinte est étanche en partie courante, l'étanchéité doit être prolongée pour assurer la continuité avec l'ancrage.

9.1.3.2. Milieu intermédiaire

En partie courante du hauban, le milieu intermédiaire est généralement constitué :

- soit, d'un colmatage de l'espace intermédiaire au moyen d'un produit de remplissage adapté, généralement de type cire, graisse ou résine ;
- soit, d'un courant d'air à hygrométrie contrôlée permanent autour des armatures, au moyen d'une installation de déshumidification. Cette disposition devra alors éviter la condensation entre les barrières.

Pour les torons à sept fils gainés individuellement des haubans MTP, et les torons TMC, le matériau de remplissage est mis en œuvre dans les ateliers du tréfileur ou du toronneur. Pour les armatures protégées collectivement des autres types de haubans, le matériau de remplissage est injecté en atelier de préfabrication des haubans, ou sur le chantier après installation du hauban.

Les haubans MTP et MFP protégés par une gaine collective ne doivent pas être injectés au coulis de ciment.

Le coulis de ciment dans une gaine collective ne constitue pas un produit de remplissage empêchant efficacement la circulation d'eau dans le milieu intermédiaire. En effet, il se fissure sous l'effet du retrait et des flexions des haubans, et ne constitue plus une protection continue.

De plus, l'expérience montre que, loin de jouer le rôle de produit d'interposition, le coulis de ciment peut au contraire amorcer des phénomènes d'usure UIP. Des essais de fatigue ont révélé des traces d'oxydes de fer à l'interface armature-coulis.



Photo 33 : toron rompu au cours d'un essai de fatigue

Enfin, la différence des coefficients de dilatation du coulis de ciment et du PEHD peut être à l'origine de désordres sur les gaines injectées au coulis de ciment. Toutefois, ce dernier phénomène ne se produit pas pour les gaines métalliques, qui ont le même coefficient de dilatation que le coulis.

ARTICLE 9.2. CATÉGORIE MTP : HAUBANS MULTI-TORONS PARALLÈLES

Les haubans multi-torons sont constitués de torons parallèles, ancrés individuellement. Les torons sont protégés par un dépôt métallique et une gaine injectée individuelle ou collective.

9.2.1. Armatures

Les armatures des haubans MTP sont des torons conformes à la norme NF A 35-035 (révision 2000), agréés par la CIP et ayant les caractéristiques suivantes :

- diamètre nominal : 15,2 mm (torons T15,2) ou 15,7 mm (torons T15,7) ;
- section résistante nominale : 140 mm² ou 150 mm² respectivement ;
- masse linéique nominale du toron nu : 1,086 kg/m ou 1,172 kg/m respectivement ;

- revêtement de protection d'un dépôt métallique de zinc ou d'un alliage zinc et aluminium normalisé compris entre 190 et 350 g/m² (épaisseur moyenne de 26 à 40 μm environ) ;
- classe de résistance f_{rg} 1770 MPa ou 1860 MPa ;
- allongement relatif sous charge maximale A_{gt} supérieur ou égal à 3,5 % ;
- module d'élasticité du faisceau de torons parallèles de l'ordre de 190 GPa \pm 5 % ;
- très basse relaxation (TBR) : inférieure ou égale à 2,5 % à 1000 heures sous 0,7 F_m (à 20°) ;
- catégorie B de la norme NF A 35-035 (révision 2000), c'est-à-dire armatures d'aptitudes particulières satisfaisant aux conditions d'essai suivantes :
 - ⇒ tenue en fatigue : 2 millions de cycles avec une contrainte maximale de 0,45 F_{rg} et une variation de contrainte de 300 MPa ;
 - ⇒ coefficient de traction déviée inférieur ou égal à 20 %.

Les valeurs nominales et les tolérances s'appliquent aux produits revêtus et s'entendent donc revêtement métallique compris. Les longueurs de torons produites de façon courante peuvent contenir des soudures faites sur les fils individuels avant tréfilage, mais ne peuvent contenir aucune soudure effectuée pendant ou après le tréfilage.

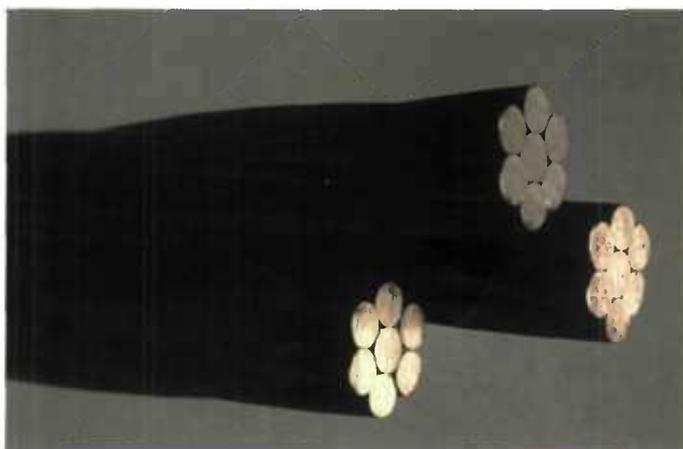


Photo 34 : détail d'un toron

Le cahier des charges du projet peut fixer des exigences plus strictes, notamment concernant le dépôt métallique de protection, dans les limites indiquées au paragraphe 9.1.2.1.

9.2.2. Haubans multi-torons protégés individuellement

Le toron galvanisé gainé protégé est un produit élaboré spécifiquement pour l'application au haubanage. La gaine individuelle est réalisée par extrusion de polyéthylène à haute densité (PEHD) directement sur le toron préalablement enrobé par un produit de remplissage.

L'emploi de torons gainés par enfilage sur une armature d'une gaine préalablement extrudée est proscrit en haubanage définitif.

La norme expérimentale NF XPA 35-037 en cours de rédaction, regroupe la plupart des exigences ci-dessous.

9.2.2.1. Gaine individuelle

La gaine individuelle est un élément très important de la durabilité des haubans. Ses caractéristiques fonctionnelles sont propres à chaque système de haubanage. Elle doit au minimum satisfaire les conditions suivantes :

- gaine extrudée à partir de compound PE 80 ou PE 100 conforme au règlement de la marque NF 114 ;
- stabilité au rayonnement ultraviolet vérifiant la condition E de la norme ASTM D 3350 ;
- teneur en noir de carbone de $2,3 \pm 0,3$ % en masse (norme ISO 6964) ;

- indice de dispersion du noir de carbone inférieur à 3 et répartition inférieure à la cotation C2 (norme ISO 4437) ;
- teneur en agent antioxydant supérieure à 1000 PPM dans la composition finale du PEHD constituant la gaine ;
- indice de fluidité de 5 kg à 190°C inférieur à 1 gramme par 10 minutes (norme NF EN ISO 1133) ;
- température de fusion supérieure à 130°C (norme ISO 3146) ;
- temps d'induction d'oxydation à 200°C supérieur à 20 minutes (norme ISO/TR 10837 ou ASTM D 3350) ;
- épaisseur comprise entre 1,5 mm (mini) et 2,0 mm (maxi) ;
- diamètre extérieur inférieur à 19,5 mm ;
- densité du produit noir à 23°C supérieure à 925 kg/m³ (norme NF EN ISO 1183) ;

Propriétés mécaniques :

- contrainte de traction au seuil d'écoulement supérieure à 19 MPa à 23°C (norme NF EN ISO 527) ;
- allongement à la rupture supérieur à 350 % (norme NF EN ISO 527) ;
- résistance au choc Izod supérieure à 20 kJ/m² à 23°C (norme NF EN ISO 180) ;
- résistance à la fissuration sous contrainte F 50 supérieure à 1000 h, (norme ASTM 1693, condition B).

A titre d'exemple, la masse linéique nominale d'un toron T15,7 protégé par une gaine de 1,5 mm d'épaisseur est de 1,29 kg/ml.

La gaine peut être noire (cas le plus fréquent) ou d'une autre couleur (blanc, rouge, vert, etc.)

La formulation d'un "compound" prêt à l'emploi, avec tous ses adjuvants et mélangé de façon homogène, est recommandée pour garantir la concentration et la répartition des additifs (protection et couleur) dans l'épaisseur de l'enveloppe plastique.

9.2.2.2. Colmatage

Le procédé de fabrication doit garantir le remplissage des vides intérieurs entre fils élémentaires du toron, et des vides extérieurs entre toron et gaine. Ces vides sont colmatés par un produit hydrophobe, adhérent aux torons, stable dans le temps et non corrosif, défini à l'article 9.5.

La masse de produit de remplissage est définie par le procédé de haubanage, en assurant au moins la présence d'un film recouvrant toute la surface des fils et le colmatage des vides interfilaires.

En fonction de la quantité de produit de remplissage utilisée, le contour intérieur de la gaine extrudée est circulaire ou suit la surface extérieure du toron. Il en est de même du contour extérieur.

Le frottement visqueux de la gaine sur le toron doit prendre en compte les phénomènes thermiques et dynamiques auxquels est soumis le hauban en service ; elle s'exprime par la force de frottement gaine/toron par unité de longueur.

Le dispositif d'étanchéité de certains ancrages (voir 10.4.3) n'est pas compatible avec un déplacement des gaines individuelles par rapport aux torons. Inversement, le matériau employé pour la gaine doit résister aux contraintes thermiques engendrées par l'adhérence éventuelle sur l'acier.

9.2.2.3. Enveloppe externe

Les torons individuellement protégés peuvent être regroupés dans une enveloppe externe, étanche ou non, destinée à assurer des fonctions complémentaires à la protection anti-corrosion. Il ne s'agit donc pas nécessairement d'une barrière mais on peut se référer aux recommandations de l'article 9.5.



Photo 35 : torons individuellement protégés regroupés dans une enveloppe externe

Cette enveloppe peut être constituée d'une gaine générale dans laquelle sont introduits les torons, ou au contraire de demi coquilles clipsées entre elles, autour du hauban, après la mise en tension. Elle améliore le comportement aérodynamique du hauban et éventuellement son étanchéité ainsi que son aspect esthétique. La surface de cette enveloppe externe peut être munie de sculptures en relief, en forme de spirale par exemple, pour lutter contre les effets d'instabilité pluie + vent.

9.2.2.4. Schéma de principe des câbles MTP à constitués de torons gainés protégés

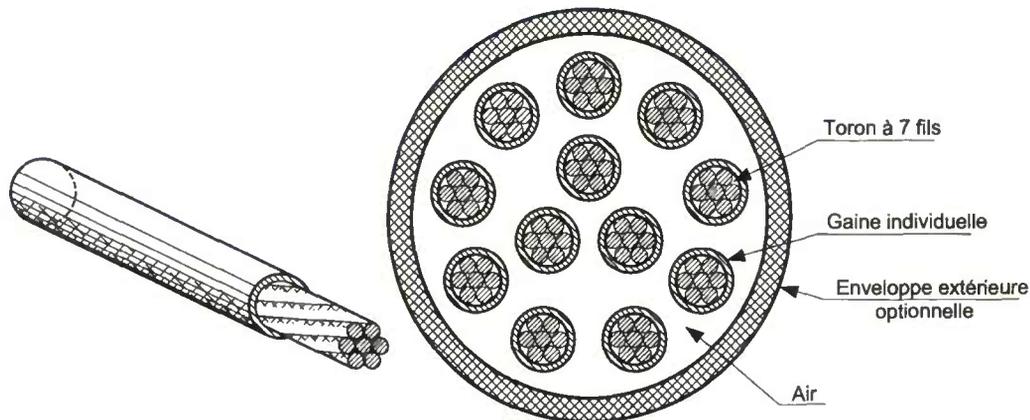


Figure 31 : schéma de principe d'un câble MTP à gaines individuelles

9.2.3. Haubans multi-torons protégés collectivement

9.2.3.1. Conduit collectif

En partie courante, la seconde barrière des haubans multi-torons protégés collectivement est habituellement constituée par l'un des conduits continus suivants :

- gaine collective en matière plastique formée de tubes semi rigides ou rigides, de type polyéthylène à haute densité (PEHD) ou similaire ;
- gaine collective métallique formée de tubes assemblés bout à bout et protégés contre la corrosion ou inoxydables.

La description de détail de cette gaine est commune aux haubans MTP et MFP. Elle est donnée dans l'article 9.5.

9.2.3.2. Milieu intermédiaire

En partie courante du hauban, le milieu intermédiaire entre torons et conduit collectif est habituellement constitué :

- soit, d'un colmatage de l'espace intermédiaire et des vides internes aux torons par un produit de remplissage souple, généralement de type cire, graisse ou résine ;
- soit, de la création d'un courant d'air permanent à hygrométrie contrôlée autour des armatures, au moyen d'une installation de déshumidification.

L'utilisation de coulis de ciment est proscrite.

La description de détail du produit d'injection est commune aux haubans MTP et MFP. Elle est donnée dans l'article 9.5.

9.2.3.3. Schéma de principe des câbles MTP à gaine collective

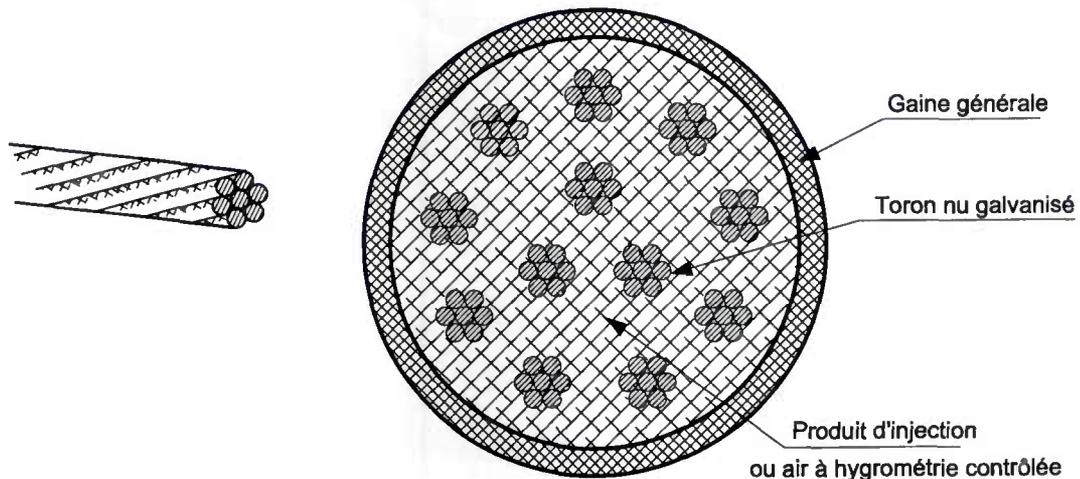


Figure 32 : schéma de principe d'un câble MTP à gaine collective

9.2.4. Caractéristiques des unités multi-torons courantes

Le tableau ci-dessous fournit, à titre indicatif, quelques valeurs pour les unités de haubans MTP couramment réalisées. Par le principe même des haubans multi-torons parallèles, toutes les unités intermédiaires peuvent être réalisées, pratiquement sans limitation.

Les efforts sont indiqués pour des torons T15,7 de classe 1770 MPa. On se reportera aux notices techniques des procédés pour plus de précisions.

Unité T15,7	F_{rg} (kN)	$0,45 F_{rg}$ (kN)	Section résistante (mm ²)	Masse linéique (kg/ml)
1	266	119	150	1.2
7	1859	836	1050	8.2
12	3186	1434	1800	14.1
19	5045	2270	2850	22.4
27	7169	3226	4050	31.8
37	9824	4421	5550	43.6
55	14603	6571	8250	64.8
61	16196	7288	9150	71.8
73	19382	8722	10950	86.0
91	24161	10872	13650	107.2
127	33719	15173	19050	149.5

Tableau 1 : unités MTP courantes

ARTICLE 9.3. CATÉGORIE MFP : HAUBANS MULTI-FILS PARALLÈLES

9.3.1. Armatures

Les armatures des haubans MFP sont des fils lisses revêtus, conformes à la norme NF A 35-035 (révision 2000), agréés par la CIP et ayant les caractéristiques suivantes :

- diamètre nominal 7 mm ;
- section résistante nominale : 38,5 mm² ;
- masse linéique nominale d'un fil de 7 mm : 0,301 kg/ml ;
- revêtement de protection d'un dépôt métallique de zinc ou d'un alliage de zinc et aluminium normalisé compris entre 190 et 350 g/m² (épaisseur moyenne de 26 à 50 μm environ) ;
- classe de résistance f_{rg} 1670 MPa ou 1770 MPa ;
- allongement relatif sous charge maximale A_{gt} supérieur ou égal à 3,5 % ;
- module d'élasticité du faisceau de fil de 7 mm de l'ordre de 200 GPa ± 5 % ;
- très basse relaxation (TBR) : inférieure ou égale à 2,5 % à 1000 heures sous $0,7 F_m$;
- catégorie B de la norme NF A 35-035 (révision 2000) c'est-à-dire fils d'aptitudes particulières satisfaisant à la condition d'essai suivante :
 - ⇒ tenue en fatigue : 2 millions de cycles avec une contrainte maximale de $0,45 F_{rg}$ et une variation de contrainte de 300 MPa.

Les valeurs nominales et les tolérances s'appliquent aux produits revêtus et s'entendent donc revêtement métallique compris. Les longueurs de fils utilisées ne peuvent contenir aucune soudure après tréfilage.

Pour des raisons spécifiques à l'ancrage, les aciers destinés à ce procédé doivent être de qualité boutonnable : un essai, en cours de fabrication des fils chez le tréfileur, doit valider les caractéristiques géométriques du bouton réalisé sur une boutonneuse.

Cet essai constitue un point d'arrêt, qui est levé en contrôlant les dimensions et tolérances géométriques suivantes, indiquées pour un fil de diamètre $d = 7$ mm :

- hauteur du bouton $H = 7,2 \pm 0,2$ mm,
- diamètre extérieur du bouton $D = 10,0 \pm 0,3$ mm.

Le revêtement des fils ne doit en aucun cas être retiré par le boutonnage

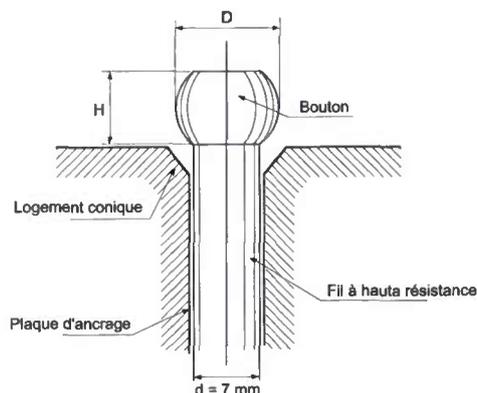


Figure 33 : schéma de principe d'un fil de 7 mm boutonné

9.3.2. Conduit collectif

En partie courante, la seconde barrière des haubans multi-fils parallèles est habituellement constituée par l'un des conduits continus suivants :

- gaine collective en matière plastique formée de tubes semi rigides ou rigides, de type polyoléfine, polyéthylène à haute densité (PEHD) ou similaire ;
- gaine collective métallique formée de tubes assemblés bout à bout, protégés contre la corrosion ou inoxydables.

La description de détail de cette gaine est commune aux haubans MTP et MFP. Elle est donnée dans l'article 9.5.

9.3.3. Milieu intermédiaire

En partie courante du hauban, le milieu intermédiaire entre fils parallèles et conduit collectif est habituellement constitué :

- soit, d'un remplissage de l'espace intermédiaire au moyen d'un produit de remplissage souple, généralement de type cire, graisse ou résine ;
- soit, d'un courant d'air permanent à hygrométrie contrôlée autour des armatures, au moyen d'une installation de déshumidification.

L'utilisation de coulis de ciment est proscrite.

La description de détail du produit d'injection est commune aux haubans MTP et MFP. Elle est donnée dans l'article 9.5.

9.3.4. Schéma de principe des câbles MFP

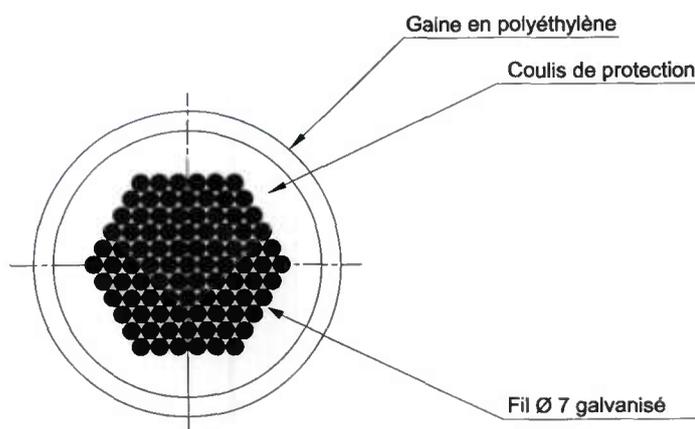


Figure 34 : coupe transversale d'un hauban multi-fils parallèles

9.3.5. Caractéristiques des haubans MFP courants

Le tableau ci-après fournit, à titre indicatif, quelques valeurs pour les unités de haubans MFP couramment réalisées.

Ces valeurs correspondent à des fils de diamètre 7 mm de classe 1670 MPa, formant un faisceau de fils parallèles :

- charge de rupture garantie F_{rg} ;
- diamètre extérieur de la gaine \varnothing_{ext} ;
- section résistante totale ;
- masse linéique d'armatures.

Ces indications sont fournies pour les deux systèmes, avec coincement conique ou sans coincement conique (voir article 9.3.) On se reportera aux notices techniques des procédés pour plus de précisions.

Câbles avec coincement conique					Câbles sans coincement conique				
Fils d = 7 mm	F_{rg} (kN)	\varnothing_{ext} (mm)	Section résistante (mm ²)	Masse linéique (kg/ml)	Fils d = 7 mm	F_{rg} (kN)	\varnothing_{ext} (mm)	Section résistante (mm ²)	Masse linéique (kg/ml)
19	1221	75	731.5	5.7	30	1928	75	1155	9.0
31	1992	75	1193.5	9.3	42	2699	75	1617	12.6
61	3920	90	2348.5	18.4	66	4242	90	2541	19.9
73	4692	110	2810.5	22.0	78	5013	110	3003	23.5
91	5848	110	3503.5	27.4	90	5784	110	3465	27.1
121	7777	125	4658.5	36.4	102	6555	125	3927	30.7
139	8933	125	5351.5	41.8	120	7712	125	4620	36.1
151	9705	140	5813.5	45.5	144	9256	140	5544	43.3
163	10476	140	6375.5	49.1	162	10411	140	6237	48.8
187	12018	140	7199.5	56.3	180	11568	140	6930	54.2
211	13560	160	8123.5	63.5	204	13111	160	7854	61.4
223	14332	160	8585.5	67.1	216	13882	160	8316	65.0
241	15489	160	9278.5	72.5	234	15039	160	9009	70.4
253	16260	160	9740.5	76.2	246	15810	160	9471	74.0
283	18188	180	10895.5	85.2					
295	18959	180	11357.5	88.8					
313	20116	180	12050.5	94.2					
325	20887	180	12435.5	97.8					
337	21659	180	12974.5	101.4					
349	22430	200	13436.5	105.0					
367	23587	200	14129.5	110.5					
379	24358	200	14591.5	114.1					
397	25515	200	15284.5	119.5					
421	27057	200	16208.5	126.7					

Tableau 2 : unités MFP courantes

ARTICLE 9.4. CATÉGORIE TMC : HAUBANS À TORONS MULTI-COUCHES

Les haubans à torons multi-couches sont constitués d'un ou plusieurs câbles monotorons.

9.4.1. Armatures utilisées

Un câble monotoron multi-couches est constitué de fils élémentaires enroulés en hélice autour d'un fil d'âme, en plusieurs couches successives. Ces couches sont généralement à pas inversés, ce qui engendre des contacts interfilaires ponctuels, ou au contraire enroulés avec le même pas et des fils de diamètres choisis pour obtenir des contacts interfilaires linéiques.

Le diamètre extérieur d'un TMC dépend du nombre de couches et des diamètres des fils élémentaires ; il varie sur demande de 20 à 150 mm. La composition de ce type de câble est définie de façon spécifique pour chaque projet.

Les fils élémentaires peuvent être ronds ou profilés. Les fils profilés sont utilisés sur certains câbles pour réaliser les couches extérieures (2 à 4 couches de fils profilés emboîtés), les couches intérieures étant alors réalisées avec des fils ronds : ce type de câble est appelé "câble clos".

Les fils extérieurs profilés ont été développés par la construction mécanique pour améliorer l'étanchéité des câbles, mais aussi pour répondre à la nécessité mécanique d'une surface extérieure cylindrique, apte à passer sur des poulies ou réas. A l'origine, ils étaient surtout destinés aux câbles de téléphériques et remontées mécaniques, puis leur usage a été étendu aux structures de génie civil et off-shore. L'emploi de câble clos n'apporte pas des garanties suffisantes vis à vis de la protection anti-corrosion, en particulier pour les haubans déviés par des selles. Il ne dispense donc pas de prévoir une seconde barrière anti-corrosion (enveloppe externe). Il en est de même pour les TMC à fils ronds.

Les fils élémentaires ronds et profilés des haubans TMC sont des fils revêtus conformes aux spécifications de la norme NF XPA 35-036 "Fils en acier destinés aux câbles porteurs fixes pour les structures de bâtiment et de génie civil". Ils présentent les caractéristiques suivantes :

- diamètre nominal des fils ronds ou hauteur nominale des fils profilés compris entre 2 mm et 8 mm ;
- revêtement de protection par un dépôt métallique de zinc ou d'un alliage zinc-aluminium, de classe A au minimum ;
- classe de résistance f_{rg} des fils 1570 MPa, 1670 MPa, 1770 MPa ou 1860 MPa ;
- allongement relatif total après rupture supérieur à 4 % (ou bien allongement relatif sous charge maximale A_{gt} supérieur à 3,5 %).

Les valeurs nominales et les tolérances s'appliquent aux produits revêtus et s'entendent donc revêtement compris. C'est en particulier le cas de la section résistante et du module élastique indiqué dans la notice technique.

La norme NF A 47-242 "Fils destinés aux câbles pour appareils de remontées mécaniques et structures suspendues" est devenue obsolète et ne doit plus être utilisée pour les câbles de haubanage.

Le cahier des charges du projet fixe les exigences concernant la masse de dépôt métallique de protection, dans le respect des limites techniques indiquées au paragraphe 9.1.2.1.

La norme NF XPA 35-036, publiée en 2001, spécifie deux classes de revêtement correspondant au mode d'application du revêtement de protection et à son épaisseur :

- ⇒ classe A pour un revêtement épais, généralement par immersion à chaud en une ou plusieurs passes, en phase finale après tréfilage ;

⇒ classe B pour un revêtement moins épais que celui de la classe A, généralement obtenu par immersion à chaud en une seule passe, en cours de fabrication avec retraits ultérieurs.

Il convient de noter que le retraits ultérieurs de la classe B permet de compenser une partie de la perte de résistance de l'acier lors de la galvanisation à chaud de l'acier.

D'autres classes de revêtement sont possibles en particulier les classes xA multiple de A (par exemple 1.5A, 2A et 3A) ainsi que les classes intermédiaires AB.

Les performances mécaniques des haubans TMC, telles que module d'élasticité ou résistance maximale, dépendent de la structure du câble (nombre et composition des couches, pas de toronnage, diamètre extérieur etc.) Le module élastique des haubans TMC est précisé dans la notice technique du procédé de haubanage, où il est calculé au cas par cas. Il est couramment compris entre 155 et 175 GPa. Un essai de traction doit être effectué pour déterminer cette valeur.

Le module d'élasticité efficace d'un toron multi-couches doit être considéré comme indéterminé jusqu'à ce qu'il ait pris sa place, soit par pré-étirement en usine, soit par mise en tension en cours de montage. Le premier chargement d'un TMC se traduit par un module d'élasticité plus faible que pour les chargements ultérieurs, et une déformation irréversible.

9.4.2. Faisceau de câbles TMC élémentaires

Pour s'adapter aux capacités portantes requises par le projet, et éviter l'emploi de câbles élémentaires de trop forte puissance nécessitant des moyens de manutention lourds, les haubans TMC peuvent être composés de plusieurs câbles élémentaires multi-couches regroupés en faisceaux.

Lorsque des faisceaux de TMC sont proposés, le fournisseur du procédé de haubanage doit définir les dispositions spécifiques retenues pour :

- maintenir la géométrie du faisceau en zone courante ;
- épanouir les câbles élémentaires en zone d'ancrage.

Pour des raisons de stabilité aérodynamique, une enceinte externe étanche doit être envisagée. La protection anticorrosion du faisceau doit être assurée par un système de déshumidification permanente de l'air intérieur.

L'égalité de tension entre les câbles élémentaires doit être garantie par des dispositions adéquates lors de l'installation (voir chapitre 12.)

9.4.3. Enceinte externe des haubans TMC

La seconde barrière anti-corrosion des haubans TMC peut être assurée de diverses façons. En particulier, l'enceinte externe étanche est constituée de l'une des formes suivantes :

- gaine semi-rigide en matière plastique extrudée directement sur le monotoron ;
- revêtement extérieur renouvelable sur la périphérie du monotoron.

Le choix de l'un ou l'autre des modes de protection dépend des conditions particulières du projet. Le revêtement extérieur peut s'avérer initialement plus économique, mais il s'agit d'une protection externe périssable nécessitant un renouvellement périodique.

L'utilisation d'un revêtement extérieur plutôt qu'une gaine pour la seconde barrière d'un hauban TMC comporte des sujétions d'entretien qu'il convient d'évaluer au préalable, en fonction de possibilités d'accès aux haubans, de la qualification de la main d'œuvre localement disponible et de la fréquence prévue des visites de surveillance.

9.4.3.1. Gaine semi-rigide

La gaine externe des câbles monotoron est réalisée par extrusion d'un produit plastique, de type polyéthylène à haute densité (PEHD) ou polypropylène, directement sur le TMC, préalablement enrobé et colmaté par un produit de remplissage.

Le PEHD utilisé a des caractéristiques similaires à celles des gaines individuelles des torons élémentaires des haubans MTP individuellement protégés (voir 9.2.2.1.) à l'exception de l'épaisseur de gaine. Il est de qualité PE 80 ou PE 100 conforme au règlement de la marque NF 114.

L'épaisseur de la gaine extrudée d'un câble monotoron varie en fonction du diamètre du câble. Pour des diamètres de câble nu \varnothing_{ext} variant de 20 mm à 150 mm, l'épaisseur de la gaine est au moins égale à $\varnothing_{\text{ext}} / 15$ et ne doit pas être inférieure à 3 mm.

La gaine externe des TMC assure des fonctions complémentaires à la protection anti-corrosion :

- fonction esthétique : la gaine peut être colorée par pigmentation dans la masse ou coextrusion,
- fonction aérodynamique : la gaine est munie de sculptures en relief, en forme de spirale par exemple, pour lutter contre les effets d'instabilité pluie + vent.

9.4.3.2. Revêtement extérieur

Le revêtement extérieur des TMC est généralement appliqué après l'installation du hauban. Ce revêtement peut notamment être :

- soit, un système multi-couches à base de peinture riche en zinc ;
- soit, un revêtement de résine époxy ou similaire.

L'enroulage d'une bande adhésive autour d'un TMC ne constitue pas une enceinte externe étanche, en l'état actuel de la technique. Cette bande peut toutefois avoir d'autres fonctions que la protection anti-corrosion (coloration ou réflexion).

Le support doit recevoir une préparation adaptée préalablement à l'application du revêtement. La nature de ce revêtement doit être compatible avec le produit de remplissage intérieur du TMC. Les produits utilisés pour le remplissage intérieur et le revêtement extérieur doivent être définis par le fournisseur dans la notice technique du procédé de haubanage.

Le fait que la surface extérieure des câbles clos à fils extérieurs profilés soit cylindrique est de nature à faciliter la préparation et l'application du revêtement de protection.

Ce revêtement a généralement une durée de vie nettement inférieure à la durée de vie du hauban, et doit donc être renouvelé régulièrement pendant la durée de vie du hauban, selon les indications du fournisseur (échéance de quinze ans environ).

9.4.4. Colmatage

Pour compléter l'enceinte externe, et assurer l'efficacité de la seconde barrière anti-corrosion, un remplissage intérieur des vides entre les fils, par un produit souple adapté, est nécessaire. Ce colmatage des couches internes du TMC est également indispensable pour prévenir les phénomènes d'UIP et FIP.

Le produit de remplissage doit être compatible avec l'enroulage du câble sur une bobine pendant son transport de l'usine au chantier.

Le produit de remplissage est propre à chaque procédé de haubanage. Ce peut être un dérivé pétrolier, une graisse chargée de poudre métallique (poudre d'aluminium par exemple), etc. Il est mis en œuvre entre chacune des couches du TMC, lors de son câblage en usine, selon une procédure spécifique à préciser par le fournisseur.

Quand l'enceinte externe est constituée d'un revêtement renouvelable, et notamment d'une peinture, le colmatage des couches périphériques doit être effectué selon une procédure spécifique permettant d'éviter des problèmes de ressuage lors de l'application de ce revêtement.

9.4.5. Schéma de principe des câbles TMC

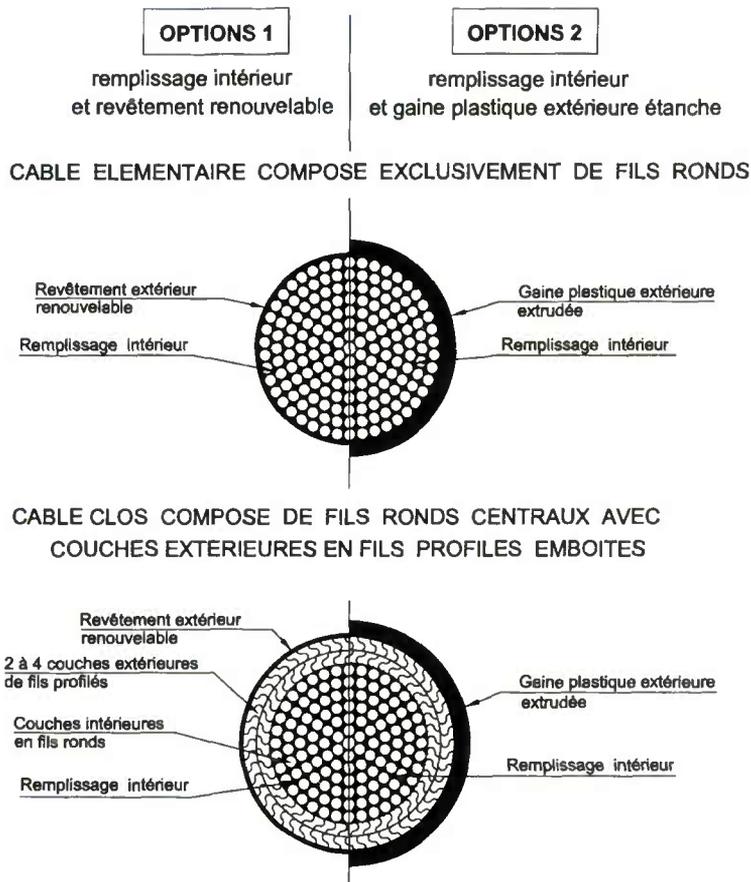


Figure 35 : coupes transversales types des câbles TMC

9.4.6. Caractéristiques des câbles TMC courants

Les dimensions et les caractéristiques des fils élémentaires constituant un câble TMC, ainsi que le nombre et le pas de toronnage des couches successives, sont adaptées aux spécifications particulières de chaque projet.

Le tableau ci-dessous fournit, à titre indicatif, quelques caractéristiques mécaniques de torons multi-couches courants pour une classe de résistance modeste. Les câbles clos utilisant des fils profilés sur les couches extérieures ont, à diamètre égal, des performances supérieures du fait de leur compacité.

Les caractéristiques suivantes sont indiquées en fonction du diamètre extérieur \varnothing_{ext} du câble nu pour des fils de classe 1570 MPa :

- section résistante totale ;
- charge de rupture garantie F_{rg} ;
- masse linéique.

Il convient de prendre en compte l'épaisseur de la gaine pour obtenir l'encombrement total du TMC. On se reportera aux notices techniques des procédés pour plus de précisions.



Photos 36 et 37 : câbles TMC

Ø _{ext} du câble nu (mm)	Câble à fils ronds			Câbles clos, à fils ronds + profilés		
	Section résistante (mm ²)	F _{rg} (kN)	Masse linéique (kg/ml)	Section résistante (mm ²)	F _{rg} (kN)	Masse linéique (kg/ml)
20	219	316	1.8	-	-	-
30	530	766	4.3	594	858	5.3
40	942	1362	7.6	1090	1580	9.8
50	1501	2034	12.9	1801	2594	15.0
60	2125	3000	18.5	2502	3716	21.6
70	2936	4100	25.3	3406	4946	30.5
80	3779	5327	31.9	4552	6604	40.2
90	4869	6625	40.8	5690	8454	49.0
100	5897	8179	50.9	7060	10316	61.2
110	7364	9854	60.3	8466	12441	72.8
120	8532	11844	72.8	9999	14497	85.8
130	12285	13819	86.3	11731	17004	101.5
140	11578	16405	97.6	13423	20170	115.1
150	13536	18850	115.8	15645	23314	133.9

Tableau 3 : câbles TMC courants

ARTICLE 9.5. BARRIÈRE EXTERNE COLLECTIVE

9.5.1. Enceinte externe étanche

En partie courante des haubans MTP ou MFP collectivement protégés, cette enceinte est constituée par un conduit mécaniquement résistant, présentant une continuité de forme et assurant une continuité d'étanchéité sur toute la longueur du hauban.

Les caractéristiques de ce conduit, notamment l'épaisseur et la composition chimique, doivent permettre de satisfaire aux exigences suivantes :

- absence d'agressivité des matériaux constitutifs vis-à-vis des produits d'injection et des armatures ;

- bonne tenue au vieillissement (notamment vis-à-vis de la corrosion si il s'agit de tubes métalliques ou du rayonnement ultraviolet si il s'agit d'un tube en polyoléfine) ;
- résistance aux actions mécaniques pouvant s'exercer sur le conduit.

Ces actions mécaniques comprennent en particulier :

- *pour les haubans injectés, la pression maximale d'injection du produit souple et/ou de la pression hydrostatique compte tenu de la température maximale du produit injecté. Cette pression dépend de la hauteur totale du hauban. Elle peut être réduite en effectuant une injection du hauban par étapes, en attendant le refroidissement du produit injecté entre les étapes ;*
- *pour les haubans déviés par des selles sans interruption de conduit, la pression de contact exercée par les armatures lors de la mise en tension ou à long terme ;*
- *l'effort de flambement que pourrait causer la compression sous poids propre du conduit, lorsque celui-ci est en appui sur l'ancrage bas du hauban.*

Les conduits sont généralement des tubes en polyéthylène à haute densité (PEHD), ou des tubes en acier.

D'autres matériaux peuvent être utilisés, tels que :

- *tubes en polyoléfine autre que le PEHD, telle que le polypropylène, à l'exclusion des matières usceptibles de libérer des radicaux chimiques agressifs vis-à-vis des produits d'injection et des armatures ;*
- *gaine en matériau composite (résine armée de fibres de verre par exemple).*

Le diamètre intérieur d'un conduit doit être compatible avec l'enfilage des armatures.

La gaine externe doit pouvoir être munie de sculptures en relief sur sa surface extérieure, en forme de spirale par exemple, pour lutter contre les effets d'instabilité pluie + vent.

9.5.1.1. Tubes en polyéthylène à haute densité

Les tubes noirs ont au minimum les caractéristiques physiques suivantes :

- PE 80 ou PE 100 conforme au règlement de la marque NF 114, groupe 2 (applications à l'eau potable) de densité supérieure à 925 kg/m^3 ;
- stabilité au rayonnement ultraviolet vérifiant la condition E de la norme ASTM D 3350 ;
- teneur en noir de carbone de $2,3 \pm 0,3 \%$ en masse (norme ISO 6964) (couche interne seulement dans le cas de gaine biextrudée) ;
- indice de dispersion du noir de carbone inférieur à 3 et répartition inférieure à la cotation C2 (norme ISO 4437) ;
- teneur en agent antioxydant supérieure à 1000 PPM dans la composition finale du PEHD constituant la gaine (couche externe seulement dans le cas de gaine biextrudée) ;
- indice de fluidité de 5 kg à 190°C inférieur à 0,6 gramme par 10 minutes (norme NF EN ISO 1133) ;
- stabilité thermique supérieure à 220°C pendant 20 minutes (norme ASTM D 3350) ;
- temps d'induction d'oxydation à 200°C supérieur à 20 minutes (norme ISO/TR 10837 ou ASTM D 3350).

Propriétés mécaniques :

- contrainte de traction au seuil d'écoulement supérieure à 19 MPa à 23°C (norme NF EN ISO 527) ;
- allongement à la rupture supérieur à 350 % (norme NF EN ISO 527) ;
- module de flexion supérieur à 800 MPa en moyenne (norme ISO 178) ;
- résistance au choc Izod supérieure à 20 kJ/m^2 à 23°C (norme ISO 180) ;
- résistance à la fissuration sous contrainte F 50 supérieure à 1000 h, (norme ASTM 1693, condition B) ;

- dureté supérieure à 55 points de Shore D (norme ISO 868) ;
- épaisseur de la gaine au moins égale à $\varnothing_{\text{ext}} / 12$ avec un minimum absolu de 5 mm.

Conformément au règlement du groupe 2 de la marque NF 114, l'utilisation de polyéthylène de récupération est proscrite. Le fournisseur de tubes doit avoir une organisation de la qualité conforme à la norme NF EN ISO 9002.

L'assemblage des tronçons de tubes est fait par thermofusion : thermosoudage au miroir ou utilisation de raccords électro-soudables. Les coupes des tronçons à assembler doivent être perpendiculaires à l'axe du tube. La résistance mécanique d'un assemblage doit être supérieure à 0,9 fois celle d'un tronçon courant.

En plus des exigences ci-dessus, l'épaisseur des tubes doit permettre leur soudage au miroir. Pour des gaines de diamètre extérieur \varnothing_{ext} , cette épaisseur est au moins égale à $\varnothing_{\text{ext}} / 50$ et ne doit pas être inférieure à 4 mm.

La pérennité des propriétés mécaniques et la stabilité de la couleur de la gaine doivent être garanties par le fournisseur du procédé de haubanage, pendant une durée conforme aux spécifications du projet, par des résultats d'essais de vieillissement accéléré de type Weatherometer ou équivalent.

La matière plastique des gaines se dégrade, en particulier sous l'effet de l'oxydation et du rayonnement ultraviolet. La qualité et la durée de vie de la protection apportées par cette enveloppe plastique dépendent de son épaisseur ainsi que de la concentration, la dispersion et la répartition des additifs dans la masse (charges d'anti-oxydant et agents protecteurs absorbant les ultraviolets).

L'emploi de gaines colorées est de plus en plus fréquent. La couleur la plus utilisée est le blanc pour ses qualités de réflexion du rayonnement infrarouge. Les autres couleurs sont d'un emploi encore plus limité, dicté par des considérations esthétiques. Il est rappelé que les pigments les plus stables au vieillissement sont d'origine minérale et une qu'une variation de la teinte est à attendre en fonction de la teinte, de la durée et des conditions d'exposition.

Le noir de carbone utilisé dans les gaines noires les protège en absorbant le rayonnement ultraviolet. Il doit être remplacé par d'autres additifs dans les gaines colorées. Celles-ci sont généralement obtenues par co-extrusion d'une couche colorée sur une couche intérieure noire.

Les parties intérieures et extérieures de la gaine sont protégées contre les rayons ultraviolets par des agents antioxydants et de stabilisation. La formulation d'un "compound" prêt à l'emploi, avec tous ses additifs et mélangé de façon homogène, est recommandée pour garantir la concentration et la répartition homogène des agents protecteurs dans l'épaisseur des enveloppes extrudées.

9.5.1.2. Tubes en acier

Les aciers utilisés sont au moins de nuance S235. Les tubes doivent être conformes aux normes en vigueur (NF EN 10210, NF EN 10219 et NF XP A49-646). Ce sont des tubes ronds soudés formés à froid à partir de produits laminés à chaud ou des profilés creux circulaires.

Les tubes en acier sont livrés en longueurs droites, et accompagnés d'une attestation de conformité au cahier des charges.

L'épaisseur du tube doit respecter les conditions suivantes :

$$e > \varnothing / 50$$

$$e > 2 \text{ mm}$$

où \varnothing désigne son diamètre extérieur.

L'assemblage des tronçons de tubes en acier peut être réalisé :

- soit, par soudage bout à bout ;
- soit, par manchonnage et système d'étanchéité ;
- soit, par tulipage complété par une étanchéité ou un collage ;
- soit, par tulipage et emboutissage.

S'il est prévu d'assembler les tronçons de tube par soudage, l'épaisseur de la paroi du tube ne doit pas être inférieure à 3 mm. Les soudures doivent être conformes aux exigences de la norme (par exemple NF P22-471 qualité 1). Ces assemblages doivent être justifiés en fatigue.

Les conduits métalliques doivent être protégés extérieurement par un système anti-corrosion donnant, au moins, une garantie de 6 ans avant de dépasser le degré d'enrouillement Ri 1 défini par la norme en vigueur.

A la date d'édition du présent document, il s'agit de la norme NF T30-071 "dégradation des surfaces peintes". Cette garantie d'anti-corrosion peut être obtenue par application de peinture sur acier mis à nu après préparation de surface par décapage au degré de soin DS 2,5. Elle nécessite alors un entretien régulier (tous les dix à quinze ans environ). Alternativement, on peut également utiliser des tubes métalliques galvanisés et peints ou en acier inoxydable.

9.5.2. Produit d'injection

Le produit de remplissage du milieu intermédiaire ne doit pas engendrer de phénomène d'usure (UIP ou FIP) sur les armatures qu'il est censé protéger. C'est pourquoi l'utilisation de coulis de ciment est proscrite.

Pour colmater l'intérieur de la gaine, on utilise habituellement un produit souple de protection. Alternativement, on peut maintenir un courant d'air permanent à hygrométrie contrôlée autour des armatures, au moyen d'une installation de déshumidification.

Les produits souples de protection sont généralement des produits pétroliers injectables :

- soit, une cire microcristalline, c'est-à-dire un solide malléable cristallisé, constitué d'hydrocarbures saturés, injecté à l'état liquide (température comprise entre 80 et 120°C) [6] ;
- soit, une graisse à base d'huile minérale, c'est-à-dire un lubrifiant plastique obtenu par dispersion, sous la forme d'un réseau tridimensionnel stabilisé, d'un épaississant insoluble (type savon métallique complexe) dans un fluide lubrifiant (huile minérale) ;
- soit, une résine ou un polymère souple injecté à une température adéquate.

Le produit de remplissage du milieu ne doit pas être agressif vis-à-vis des armatures et du matériau de l'enceinte externe. Cette absence d'agressivité est déterminée par des essais physiques ou justifiée par des références d'emploi antérieurs.

Le produit de remplissage doit conserver ses propriétés de protection, sans discontinuité sur l'acier à protéger, sous les sollicitations thermiques extrêmes auxquelles il peut être soumis pendant la vie de l'ouvrage.



Photo 38 : pompe pour l'injection des haubans



Photo 39 : contrôle de l'injection

La température dans un hauban protégé par une gaine noire peut atteindre des valeurs élevées après une exposition prolongée au soleil. Des températures proches de 70°C ont été mesurées en France métropolitaine.

Les graisses peuvent poser des problèmes de stabilité thermique et sont sujettes à un phénomène de ressuage. En outre, l'étanchéité des conduits à l'huile contenue dans les graisses est délicate. On préférera donc aux graisses des produits de remplissage de type cires pétrolières ou résines souples présentant de meilleures propriétés de colmatage, d'adhésion aux armatures et de stabilité thermique.

Caractère spécifié	Méthode d'essai	Valeurs spécifiées
Point de figeage	NF T 60-128	> 77°C
Pénétration à -20°C	NF T 60-119	Absence de faiencage
Pénétration à 25°C	ASTM D 217	< 80 / 10 mm
Viscosité à 100°C	ASTM D 445	> 20 mm ² /s
Ressuage à 40°C	BA 2000-Part 121-1982 modifiée en effectuant l'essai pendant 7 jours sans le poids de 100 grammes	A 7 jours < 0,5 %
Résistance à l'oxydation 100 heures à 100°C	ASTM D 942-70	< 0,03 MPa
Corrosion cuivre 100 heures à 100°C	NF EN ISO 2160	Cotation : 1 a (absence de corrosion)
Protection contre la rouille ● Brouillard salin : 5 % NaCl, 168 heures à 35°C ± 1°C ● Brouillard : eau distillée 168 heures à 35°C ± 1°C	NF X 41-002 NF X 41-002 modifiée en remplaçant la solution de NaCl par de l'eau distillée	Passe Absence de corrosion

Tableau 4 : spécifications relatives aux cires

ARTICLE 9.6. AUTRES TYPES D'ARMATURES

9.6.1. Autres câbles en acier

Les petits câbles de diamètre 12 à 50 mm, en acier inoxydable de classe 1570 MPa, couverts par la norme pr EN 10 264.4 présentent une bonne tenue contre la corrosion mais des performances mécaniques qui ne permettent généralement pas de les retenir pour les haubans de ponts (ductilité insuffisante notamment).

Ces câbles sont habituellement utilisés pour les bâtiments industriels (toitures suspendues, haubanage de mâts, contreventement de charpentes métalliques, etc.) et les passerelles piétonnières.

9.6.2. Barres

L'utilisation de barres filetées ou crénelées à haute résistance est proscrite.

Ces barres ne peuvent être livrées en bobines et ne sont pas disponibles en longueur excédant 20 m. L'utilisation de ces barres impliquerait donc le raboutage d'éléments à l'aide de manchons coupleurs qui posent des problèmes de fatigue et de protection contre la corrosion. De plus, ces barres sont plus sensibles au cisaillement et aux déflexions angulaires que les câbles.

L'utilisation des barres en acier laminé peut convenir pour des tirants courts ou de faible capacité, lorsque tout risque de courbure forcée est écarté par la présence de rotules aux ancrages.

C'est parfois le cas pour les suspentes de pont bowstring.

Il convient dans tous les cas de concevoir et exécuter ces produits en vue de limiter les concentrations de contraintes et les effets d'entaille qui accentuent la fatigue et le vieillissement.

9.6.3. Armatures en matériaux composites

Les armatures composites à base de fibre de verre, de carbone ou d'aramide, ont des propriétés séduisantes pour la réalisation de haubans de ponts : grande résistance à la corrosion et à la fatigue, très grande résistance à la traction axiale, faible masse spécifique.

Toutefois, l'absence de palier de ductilité et la sensibilité à l'étreinte latérale exigent de nouvelles méthodes de mise en œuvre qui font actuellement l'objet de nombreuses recherches dans le monde. Quelques réalisations expérimentales ont cependant été construites ou sont actuellement en cours (Royaume-Uni, Suisse, Canada, France).

CHAPITRE 10. ANCRAGE DES HAUBANS

ARTICLE 10.1. FONCTIONS D'UN ANCRAGE DE HAUBAN

Les deux extrémités d'un hauban sont appelées zones d'ancrage et sont composées à la fois :

- de l'**ancrage** proprement dit, c'est-à-dire les dispositifs mécaniques qui transmettent la tension du hauban aux éléments d'attache de la structure (pièce de pont, nervure, tête de pylône, etc.)
- de la **zone de transition**, qui s'étend de l'ancrage au début de la zone courante du hauban (câble et barrières de protection) ; la zone de transition comprend notamment des déviateurs, des dispositifs de guidage transversal, des amortisseurs externes, ainsi que des pièces de raccordement avec la zone courante.

L'ancrage et la zone de transition assurent cinq fonctions suivantes :

10.1.1. Transfert de l'effort du hauban

L'ancrage mécanique est composé principalement d'une pièce mécanique intermédiaire qui doit être dimensionnée pour bloquer les armatures constituant le câble et transmettre leur effort à la structure d'attache. Cette pièce intermédiaire s'appelle **tête d'ancrage** pour les catégories de câbles MTP et MFP à torons ou fils parallèles. Dans le cas des haubans TMC à torons multicouches, on parle plutôt de **douille d'ancrage**.

Les armatures élémentaires sont bloquées, individuellement ou collectivement, par un dispositif de blocage spécial s'appuyant sur la pièce intermédiaire :

- **clavettes coniques** ou **manchons sertis** pour câbles MTP ;
- **boutons** pour les câbles MFP, éventuellement complétés par le coincement du faisceau de fils dans un **matériau de remplissage** ;
- **frisures** des fils élémentaires des câbles TMC, collectivement coincés par un **matériau de remplissage** dans l'alésage conique de la douille d'ancrage. L'ensemble des armatures épanouies et solidarises dans la douille constitue le **culot**.

Certains TMC de petit diamètre (15 à 29 mm) à couches non croisées peuvent également être ancrés par clavettes coniques.

10.1.2. Filtration des déflexions angulaires

L'ancrage peut comprendre des dispositifs de guidage du câble, destinés à éviter totalement ou partiellement que les déflexions angulaires du câble ne se propagent jusqu'à la tête d'ancrage ou la douille.

10.1.3. Possibilité de réglage

L'ancrage peut comprendre des dispositifs permettant à la tête d'ancrage ou à la douille de se déplacer par rapport à la structure pour assurer les réglages suivants du hauban :

- réglage axial de la tension du hauban ;
- réglage initial en orientation.

10.1.4. Protection anticorrosion et étanchéité

La conception des dispositifs d'ancrage doit prolonger de façon continue dans la zone d'ancrage les deux barrières définies au chapitre 9. qui assurent la protection anticorrosion et l'étanchéité de la zone courante du hauban.

10.1.5. Démontabilité

La conception des ancrages doit permettre le changement du câble.

ARTICLE 10.2. DISPOSITIONS GÉNÉRALES COMMUNES

10.2.1. Filtration des déflexions des haubans

Comme indiqué dans le chapitre 6 les déflexions angulaires des haubans provoquent des contraintes qui peuvent être du même ordre de grandeur que celles dues aux charges axiales et avoir des effets néfastes en fatigue.

Il convient donc de mettre en œuvre des dispositifs appropriés pour limiter ou supprimer l'effet des déflexions du hauban au niveau de la tête d'ancrage, c'est-à-dire "filtrer" les déflexions angulaires du câble vers l'ancrage.

Deux voies principales sont utilisées, assez voisines dans leurs effets :

- *Raidir la zone d'ancrage : il s'agit d'augmenter localement la raideur en flexion du hauban, par exemple en rapportant un tube métallique extérieur lié au câble à proximité de l'ancrage et encastré mécaniquement à son extrémité sur la tête d'ancrage ou sur la structure.*
- *Guider ponctuellement le câble : il s'agit de bloquer, totalement ou partiellement, les déplacements transversaux du hauban, c'est-à-dire de chacun de ses éléments constitutifs, par un dispositif de guidage placé à une certaine distance de l'ancrage. L'efficacité de ce dispositif de guidage dépend de sa distance à l'ancrage, comme indiqué en 6.2.4.1.*

Le dispositif de filtration des déviations peut avoir, en plus, une fonction d'amortisseur (absorption d'énergie de vibration par viscosité ou frottement).

La conception des dispositifs de guidage du hauban doit prendre en compte les efforts transversaux et de flexion apportés par les déformations du câble.

10.2.2. Réglage en orientation

Le réglage initial de l'orientation est permis par l'interposition entre l'ancrage et la structure de pièces d'attache autorisant la rotation du hauban ou de sa tête d'ancrage. Il s'agit par exemple d'écrou de réglage à portée sphérique, de cale bicylindrique, de chape montée sur rotule plastique ou sur axe simple ou double, etc.

Cependant, dans la plupart des cas, les dispositions de réglage initial en orientation ne sont plus efficaces après la mise en tension du hauban. Ces dispositions sont utiles surtout pendant la construction de l'ouvrage, et ne sauraient donc être considérées comme supprimant les effets de flexion liés aux vibrations des haubans.

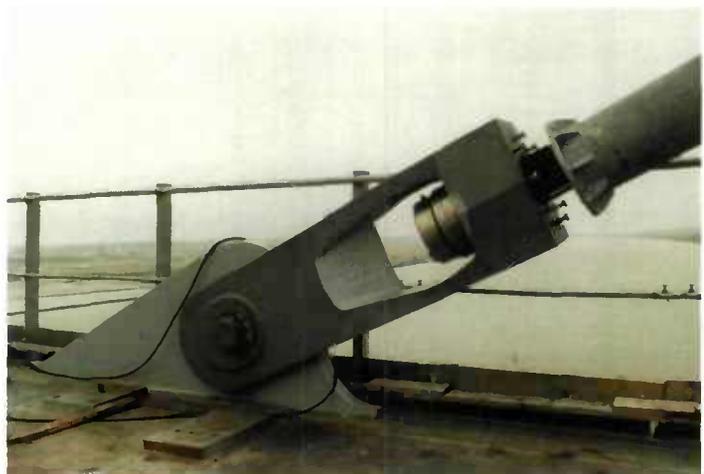


Photo 40 : ancrage bas d'un hauban du pont de Normandie avec chape rotulée

Sous l'action de la tension des haubans, les contraintes normales de contact sont souvent telles que la rotation des pièces en contact doit être considérée comme bloquée, et cela quel que soit l'état de surface de ces pièces.

Les dispositifs de type rotule plastique ainsi que les axes ou couteaux dimensionnés selon les contraintes de Hertz sont souvent sans effet vis-à-vis des vibrations de faible amplitude et grande fréquence. Ils peuvent toutefois accommoder les rotations importantes, liées aux charges d'exploitation par exemple, à condition de prendre des dispositions qui assurent la permanence des qualités de contact dans le temps.

Dans le cas contraire, si les pièces d'attache de l'ancrage à la structure interdisent tout réglage en orientation dès leur installation initiale, cela doit être pris en compte dans la conception de l'ancrage et dans les tolérances d'installation des pièces d'attache sur la structure.

C'est notamment le cas pour l'orientation du câble en sortie des tubes coffrants utilisés sur les structures en béton. Tout défaut d'installation de ces tubes coffrants se traduit par un défaut de perpendicularité du hauban par rapport à son appui sur l'ouvrage ou un défaut de coaxialité du hauban par rapport au déviateur.



▲ Photo 41 : ancrage bas d'un hauban sur le pont Utsjoki en Finlande – pièce de liaison fixe

Photo 42 : ancrage bas d'un hauban sur le pont de Seohae en Corée – pièce de liaison fixe ▶



L'orientation des pièces d'attache doit prendre en compte le tracé idéal du hauban (chaînette) dans les conditions de service de l'ouvrage à vide. Les ancrages doivent supporter des déviations angulaires statiques supérieures aux tolérances d'installation des pièces d'attache (voir 12.4.1.)

Sauf indication contraire du projet, les ancrages ou les dispositifs de guidages évoqués en 10.2.1. doivent être conçus de façon à supporter sans dommage pour le câble une déviation de ± 25 milliradians ($\pm 1,43$ degrés).

10.2.3. Protection contre la corrosion et l'usure

La continuité des deux barrières complémentaires de protection anticorrosion définies au chapitre 9. doit être assurée dans la totalité de la zone d'ancrage.

La première barrière courante est généralement assurée par un revêtement métallique des armatures qui règne sur toute la longueur du câble. Ce revêtement peut être altéré par le blocage des armatures dans l'ancrage, ce qui augmente la vulnérabilité du câble au niveau des ancrages.

La seconde barrière courante se compose d'une enceinte extérieure étanche et d'un milieu intermédiaire empêchant la circulation d'humidité. Au niveau de l'ancrage, cette enceinte courante est souvent remplacée par une **enceinte locale**, injectée avec un produit de colmatage adéquat. La continuité entre l'enceinte extérieure courante et l'enceinte locale de l'ancrage est assurée par des pièces de transition qui dépendent du procédé de haubanage.

Cette continuité doit être compatible avec les autres fonctions de l'ancrage, ce qui peut impliquer des discontinuités mécaniques des barrières.

Dans la zone d'ancrage, des dispositions doivent permettre d'évacuer l'eau de ruissellement et de condensation : écoulement, ventilation naturelle ou forcée, etc.

Tous les points de contact entre les armatures et les dispositifs de la zone de transition peuvent être le siège de phénomènes d'usure par petits débattements UIP et FIP. Des dispositions adéquates doivent être prévues dans tous points pour éviter les phénomènes d'usure et de fatigue.

Si la réussite d'un essai de fatigue de deux millions de cycles est une condition nécessaire pour l'acceptation d'un procédé de haubanage, elle ne permet pas de qualifier complètement la résistance du procédé à l'usure. Des dispositions techniques adéquates visant à protéger le hauban des phénomènes d'usure sont néanmoins indispensables.

10.2.4. Selles de déviation

Des selles de déviation sont parfois proposées pour remplacer l'ancrage des haubans dans le pylône. En évitant l'interruption des câbles, ces selles peuvent permettre de simplifier la structure du pylône (suppression partielle ou totale des dispositifs transmettant les efforts horizontaux entre haubans "avant" et "arrière").

Toutefois, on dispose d'une expérience limitée dans la conception de selles de déviation remplissant toutes les fonctions des ancrages de haubans. En particulier, le remplacement de haubans déviés par une selle pose de sérieuses difficultés. C'est pourquoi ce type de conception n'est pas recommandé.

Les selles de déviation ne font généralement pas partie des procédés de haubanage, et leur conception relève du dimensionnement de structures en béton ou en charpente métallique. Il appartient au concepteur de l'ouvrage et au détenteur du procédé de haubanage de faire la preuve de la compatibilité de la selle avec le procédé, en veillant particulièrement aux éléments suivants :

- blocage des efforts différentiels entre haubans avant et arrière ;
- continuité de la protection anti-corrosion du câble ;
- démontabilité et remplacement du hauban ;
- aptitude à supporter les sollicitations en fatigue (traction et flexion).

Des effets de fatigue et d'usure peuvent se développer au niveau de la selle, du fait de la pression radiale et du frottement des armatures élémentaires entre elles et sur la selle. En outre, dans les câbles courbés, des contraintes de flexion souvent élevées se combinent aux contraintes de traction axiale (voir 6.1.1.) Les selles nécessitent donc des essais statiques et de fatigue spécifiques. Des éléments sur la justification structurelle des câbles déviés sont donnés au chapitre 14.

10.2.5. Ancrage d'efforts transversaux

On peut être amené à fixer sur le hauban des dispositifs exerçant un effort transversal sur la partie courante du câble. C'est notamment le cas pour l'ancrage des amortisseurs externes, des aiguilles, ainsi que pour l'accrochage d'accessoires d'éclairage.

Les gaines de protection ne sont a priori pas conçues pour ancrer des dispositifs de ce type. En cas d'utilisation du hauban à cette fin sans interruption de la gaine, il convient d'effectuer une étude spécifique, en veillant à la bonne transmission des efforts transversaux au câble.

10.2.6. Caractéristiques géométriques

La notice technique du procédé de haubanage doit définir les paramètres dimensionnels suivants, repérés sur la figure 36 :

- diamètre extérieur du câble courant DC ;
- diamètre extérieur de la tête d'ancrage (ou douille) DA ;
- longueur de la tête d'ancrage (ou douille) LAR si elle est réglable et LAF si elle est fixe ;
- dimensions de l'écrou de blocage DN, de la plaque de répartition, et des oreilles ou chapes éventuelles ;
- débattement de réglage en longueur.

Le débattement de réglage du hauban doit être adapté aux conditions du projet, selon les recommandations de 12.5.2.1.

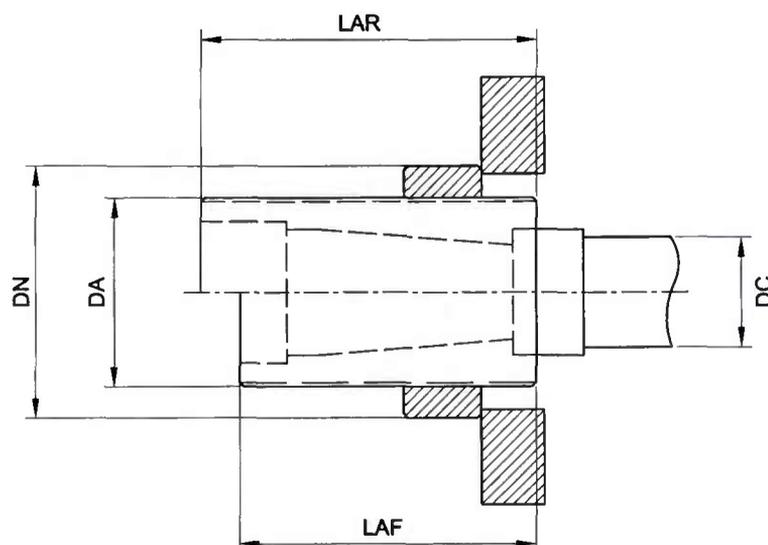


Figure 36 : caractéristiques dimensionnelles d'un ancrage

ARTICLE 10.3. CLASSIFICATION DES ANCRAGES

En fonction du principe de blocage des armatures, on peut distinguer quatre familles d'ancrages de hauban, qui conviennent généralement à une catégorie de câble bien définie, comme indiqué dans le tableau ci-dessous. Ces quatre familles sont décrites de manière détaillée dans les articles qui suivent.

Abréviation	Principe de blocage	Catégorie de câble concernée
C	Clavettes coincées dans la tête d'ancrage *	MTP (protégés individuellement ou collectivement)
M	Manchons sertis appuyés sur la tête d'ancrage *	MTP (protégés individuellement ou collectivement)
B ou B+R	Boutons appuyés sur une plaque + coincement conique éventuel par Remplissage à la résine	MFP
F+R	Frisure + coincement conique par Remplissage de la douille	TMC

* éventuellement complété par un produit de remplissage rigide adapté pour améliorer la résistance à la fatigue

Par ailleurs, on peut faire d'autres distinctions entre les différents types d'ancrages :

- **ancrage actif**, où est effectuée la mise en tension du câble, et **ancrage passif** qui ne subit pas de mise en tension ;
- **ancrage bas**, au niveau du tablier, et **ancrage haut** dans le pylône. L'ancrage bas d'un hauban est particulièrement exposé à l'eau qui ruisselle le long du câble, ce qui impose des dispositions spécifiques ;
- **ancrage fixe**, dont la tête est fixe par rapport à la structure, et **ancrage réglable**, dont la tête peut être déplacée par rapport à la structure, selon l'axe du hauban.

Enfin, une différence importante distingue les haubans utilisant des ancrages C de tous les autres : la longueur à vide d'un câble constitué de torons parallèles ancrés par clavettes est variable au cours du réglage, contrairement aux autres types de haubans pour lesquels la longueur à vide de l'armature tendue est fixée de façon irréversible avant d'introduire l'effort de traction.

ARTICLE 10.4. ANCRAGES C POUR CÂBLES DE TYPE MTP

Ces ancrages sont utilisés pour des haubans multi-torons, gainés individuellement ou collectivement.

10.4.1. Principe du procédé

Les ancrages C fonctionnent suivant le principe du coincement de chaque toron dans un logement individuel tronconique d'une tête d'ancrage, au moyen de mors coniques à deux, trois ou quatre clavettes.

Sur certains procédés de haubanage, le coincement des clavettes est complété par une injection de la tête d'ancrage avec un produit de remplissage rigide, de type résine, adapté pour obtenir des performances en fatigue satisfaisantes. Il serait alors plus approprié de désigner ces ancrages par le sigle C + R.



Photo 43 : clavettes en cours de fabrication

La tête d'ancrage est en acier spécial traité contre la corrosion. Elle est percée d'un nombre de trous cylindro-coniques supérieur ou égal au nombre de torons, à axes parallèles entre eux ou convergeant vers l'axe de l'ancrage.

Les clavettes, en acier cémenté, doivent avoir été conçues spécifiquement pour l'ancrage des haubans.

Les clavettes de hauban ont des performances en fatigue supérieures aux clavettes de précontrainte et sont conçues pour éviter tout risque de glissement des torons sous charge modérée.

10.4.2. Liaison d'un ancrage C à la structure - Zone d'ancrage

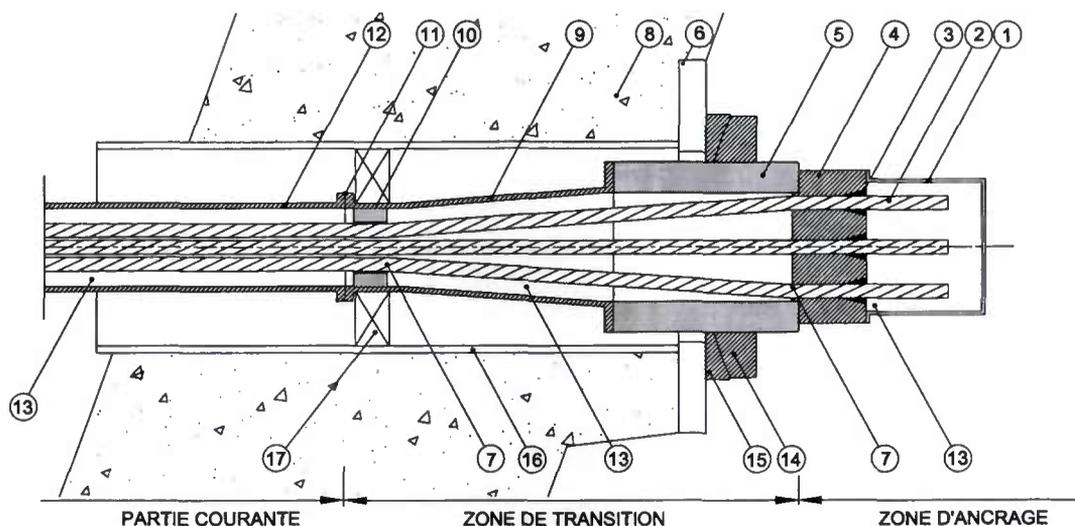
L'ancrage s'adapte au cas par cas, en fonction des besoins du projet, afin de permettre :

- la transmission de l'effort d'ancrage du hauban à la structure environnante ;
- le réglage initial et ultérieur de la tension du hauban ;
- le réglage éventuel de l'orientation du hauban.

Dans les cas courants, la tête d'ancrage peut être :

- vissée dans la structure ou dans une chape fixée à la structure ;
- appuyée directement sur la structure ou sur une chape ;
- appuyée sur la structure par l'intermédiaire d'un tube d'appui épais fileté extérieurement et d'un écrou, permettant un réglage en longueur.

Les différents types d'ancrage sont représentés schématiquement sur les dessins de principe ci-dessous



- | | |
|---|---|
| 1 - Capot de protection | 10 - Déviateur |
| 2 - Toron 7 fils | 11 - Jonction gaine - pièce de réduction |
| 3 - Clavette | 12 - Gaine , section courante |
| 4 - Bloc d'ancrage | 13 - Remplissage de protection anti-corrosion |
| 5 - Tube fileté de réglage | 14 - Ecrou (éventuellement sphérique) |
| 6 - Plaque de répartition | 15 - Rondelle d'appui (éventuellement sphérique) |
| 7 - Zones de déviation des torons | 16 - Tube coffrant (éventuel) |
| 8 - Ouvrage (béton,acier) | 17 - Dispositif filtrant les déviations par flexion |
| 9 - Pièce de réduction de section de l'enveloppe du câble | |

Figure 37 : principe d'ancrage C pour torons gainés collectivement - ancrage réglable sur plaque

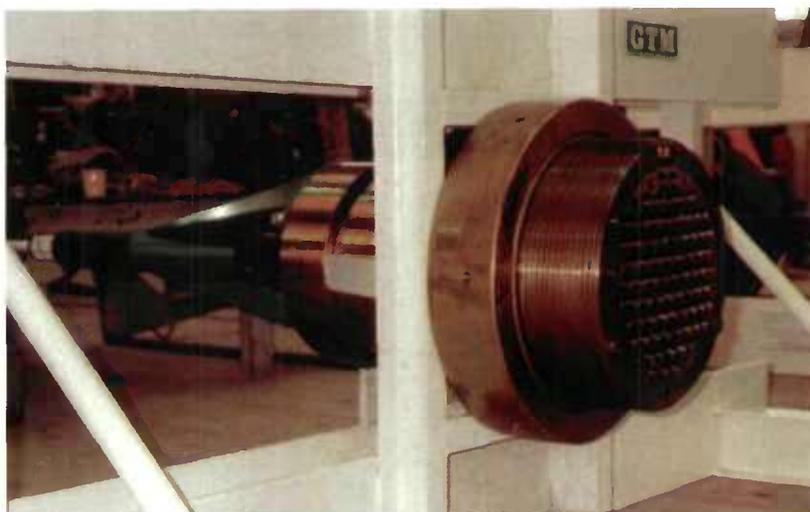


Photo 44 : ancrage d'un hauban du stade de France

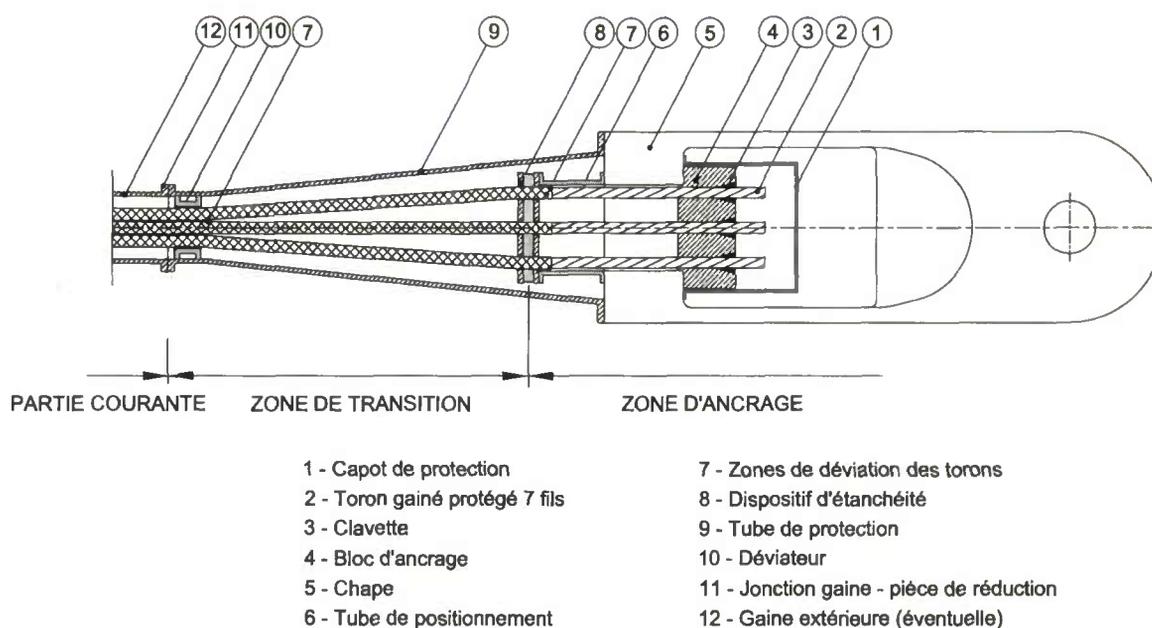


Figure 38 : principe d'ancrage C pour torons gainés individuellement ancrage non réglable sur chape

La zone de transition, qui s'étend de la fin de la partie courante du hauban à l'ancrage proprement dit, permet l'épanouissement des torons de la section courante à la tête d'ancrage.

La longueur de la zone de transition dépend du nombre de torons et des dispositions technologiques retenues pour assurer leurs déviations. La zone de transition comprend un ou plusieurs déviateurs, permettant de transformer un faisceau de torons parallèles en faisceau divergeant.

Des dispositions doivent être prises pour éviter les risques de fatigue ou d'usure en chaque point singulier : à chaque déviation du faisceau de torons, au niveau de l'entrée dans la tête d'ancrage, etc. Ces dispositions doivent être efficaces contre les surtensions axiales du hauban et les déflexions angulaires permanentes ou transitoires du câble.

Afin d'éviter le cumul des causes de fatigue (solicitations axiales et de flexion) au niveau de la tête d'ancrage, des dispositions sont prises pour bloquer à une certaine distance de l'ancrage les déplacements transversaux des torons relativement à l'axe de l'ancrage.

Ceci est généralement obtenu en immobilisant le déviateur des torons, soit par solidarisation avec la tête d'ancrage au moyen d'un tube cylindrique ou conique encastré sur la tête d'ancrage, soit par blocage du déviateur sur la structure haubanée.

10.4.3. Dispositions de protection anticorrosion

Conformément aux principes énoncés en 10.2.3. il importe de maintenir au droit de l'ancrage la redondance des barrières anticorrosion, et notamment la continuité de l'enceinte extérieure.

Cette continuité est d'autant plus importante qu'il n'est généralement pas possible de protéger directement les clavettes.

A l'extrémité du hauban, l'enceinte extérieure est constituée d'un capot amovible étanche fixé sur la tête et englobant au moins toute la zone des clavettes. Au niveau de l'ancrage, cette enceinte extérieure diffère selon que les torons sont protégés individuellement ou collectivement :

- Les torons individuellement gainés sont nécessairement dégainés dans l'ancrage, où la seconde barrière anticorrosion est constituée d'une **enceinte locale**. Celle-ci est délimitée par le capot amovible et un dispositif d'étanchéité qui assure la continuité d'étanchéité avec les gaines individuelles.
La fonction d'étanchéité de ce dispositif est souvent doublée d'une fonction de déviation des torons. Il importe de vérifier que la pression transversale des torons ne compromet pas le bon fonctionnement du dispositif d'étanchéité.
- Lorsque l'enceinte extérieure du hauban est constituée d'une gaine générale en partie courante, celle-ci est raccordée à la tête d'ancrage par une enveloppe extérieure tubulaire, résistant à la corrosion et compatible avec les besoins de réglage du hauban. On emploie souvent des raccords télescopiques constitués de brides, raccords, joints, etc. On ne peut donc pas distinguer d'enceinte locale au niveau de l'ancrage.

Pour ces deux types de haubans, la continuité d'étanchéité doit pouvoir être préservée dans les conditions de service du hauban (vibrations, mouvements, vieillissement, variations de température, etc.)

Qu'elle soit locale ou non, l'enceinte extérieure délimite au niveau de l'ancrage un milieu intermédiaire qui doit être traité conformément à 9.1.3.2. de façon à empêcher toute arrivée d'humidité ou circulation d'eau au contact des armatures.

Même si le colmatage de la zone d'ancrage à la cire microcristalline, à la résine ou à la graisse est la pratique la plus courante, on peut citer le cas du pont à haubans d'Oresund où les ancrages bas sont situés dans les membrures du tablier métallique, et sont protégés par la circulation d'air sec établie dans ces membrures.

10.4.4. Caractéristiques des unités courantes

Voir section 9.2.4.

ARTICLE 10.5. ANCRAGES M POUR CÂBLES DE TYPE MTP

Ces ancrages sont utilisés pour des haubans multi-torons, gainés individuellement ou collectivement. Dans leurs dispositions générales, ils ne diffèrent des précédents que par la nature de l'ancrage individuel des torons.

L'ancrage est obtenu par sertissage par extrusion à froid d'un manchon en acier spécial sur chacun des torons constitutifs du hauban, après qu'il ait été enfilé à travers un trou cylindrique de la tête d'ancrage. L'effort est transféré du toron à la tête d'ancrage par appui du manchon sur cette dernière.

Le sertissage des manchons étant difficile à réaliser en place, ce type d'ancrage est généralement utilisé sur les haubans préfabriqués.

Ces ancrages présentent l'avantage d'une très grande sécurité vis-à-vis du risque induit par une détension complète du hauban. Toutefois, il convient de s'assurer d'un contact permanent des manchons sur la plaque d'ancrage, pour éviter les chocs en cas de décollement.

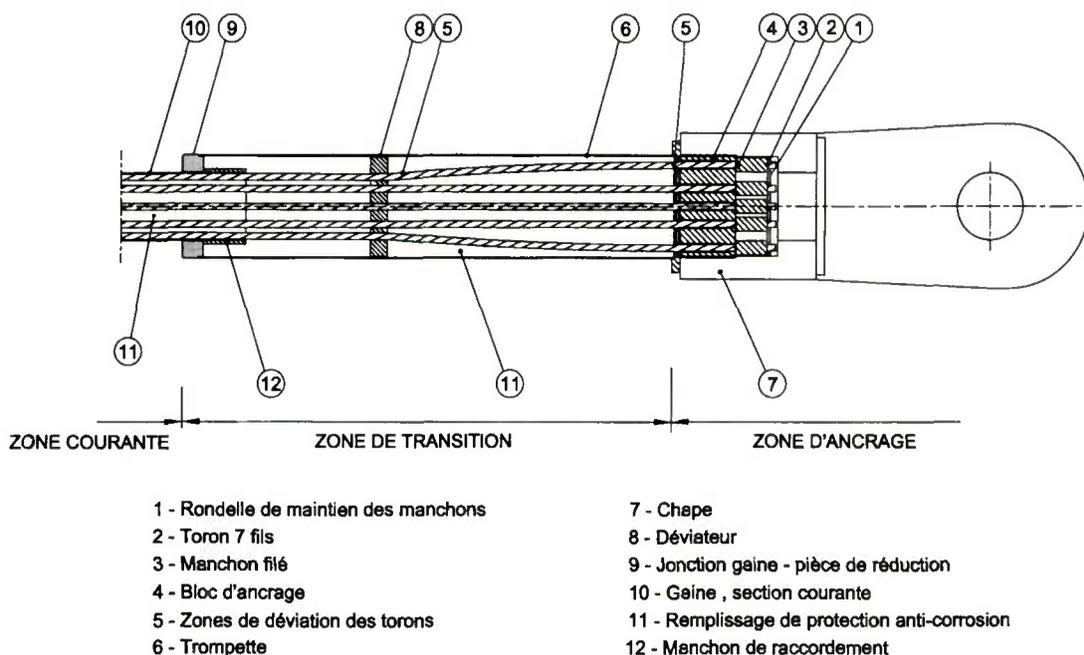


Figure 39 : principe d'ancrage M pour torons gainés collectivement
ancrage non réglable sur chepe

Comme pour les autres haubans préfabriqués, les dispositifs de réglage doivent inclure une provision tenant compte de l'imprécision, souvent minime, de préfabrication du câble et surtout des tolérances géométriques de réalisation de l'ouvrage à haubaner.

Les autres dispositions relatives à ces ancrages sont strictement comparables à celles décrites à l'article 10.4.

ARTICLE 10.6. ANCRAGES B OU B+R POUR CÂBLES DE TYPE MFP

10.6.1. Principe du procédé

Ces ancrages sont utilisés pour des haubans multi-fils parallèles. Ces fils sont d'égale longueur et comportent à leurs extrémités un bulbe, appelé bouton, refoulé à froid à l'aide d'une boutonneuse.

La forme et les dimensions des boutons et des trous correspondant doivent être telles que les résistances à la rupture et en fatigue du fil ancré satisfassent aux exigences des essais de qualification.

Il existe deux types d'ancrages pour cette famille, selon le mode de transmission des efforts à l'intérieur de l'ancrage.

10.6.1.1. Famille B+R avec coincement conique

Les boutons s'appuient sur une plaque percée de trous cylindriques terminés par des logements sphériques, ce qui permet d'ancrer chaque fil individuellement (voir figure 33)

En avant de cette plaque percée se trouve une pièce, appelée douille, munie d'un évidement conique dans lequel s'épanouissent les fils. Cette douille est remplie d'une résine chargée spéciale qui assure le coincement conique de ces fils. L'ensemble constitue une tête d'ancrage.

10.6.1.2. Famille B sans coincement conique

Les boutons s'appuient sur une plaque percée de trous cylindriques terminés par des logements sphériques, ce qui permet d'ancrer chaque fil individuellement. Cette plaque, ou tête d'ancrage, transmet la totalité de l'effort du câble, sans coincement conique. Toutefois, une injection locale des trous cylindriques à la résine permet de filtrer les variations de contrainte.

10.6.2. Liaison d'un ancrage B ou B+R à la structure

L'ancrage s'adapte au cas par cas, en fonction des besoins du projet, afin de permettre :

- la transmission de l'effort d'ancrage du hauban à la structure environnante ;
- le réglage initial et ultérieur de la tension du hauban ;
- le réglage éventuel de l'orientation du hauban.

Dans les cas courants, et indépendamment du mode d'ancrage B ou B+R, la tête d'ancrage peut être :

- appuyée directement sur la structure ou sur une chape (ancrage fixe) ;
- munie d'un filetage extérieur et appuyée sur la structure par l'intermédiaire d'un écrou, permettant un réglage en longueur ;
- munie d'un taraudage dans l'évidement intérieur derrière la plaque percée : ce taraudage permet l'utilisation d'une barre filetée relais ancrée à la structure par un écrou de réglage.

Les différents types d'ancrage sont représentés schématiquement sur les dessins de principe ci-dessous (voir photo 41).

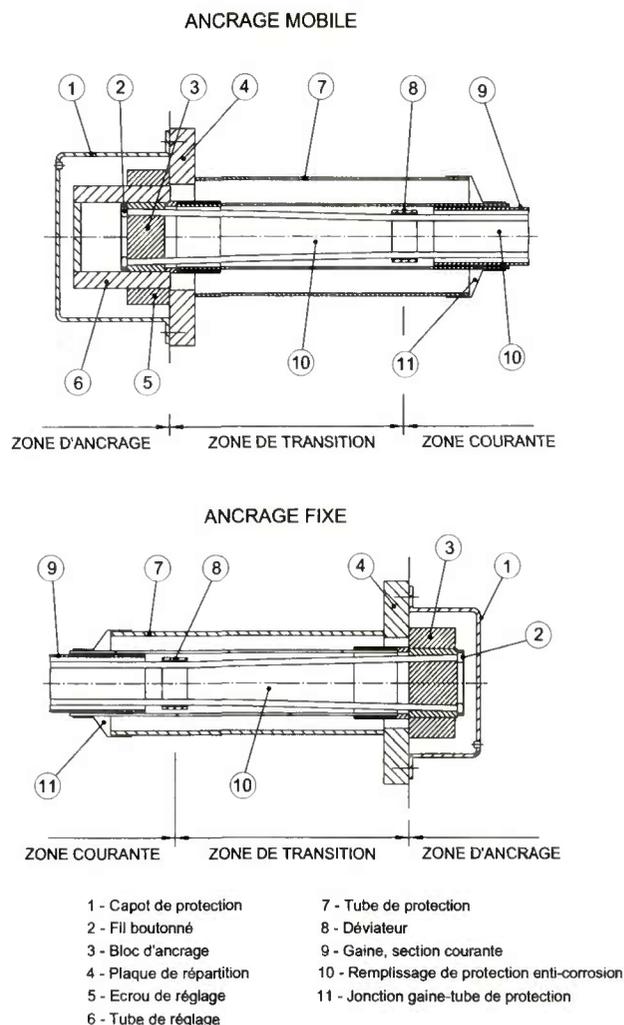


Figure 40 : principe d'ancrage B mobile ou fixe.

10.6.3. Dispositions de protection anticorrosion

Conformément aux principes énoncés à l'article 10.2.3. il importe de maintenir au droit de l'ancrage la redondance des barrières anticorrosion, et notamment la continuité de l'étanchéité de l'enceinte extérieure.

La continuité de l'enceinte extérieure est d'autant plus importante que le boutonnage est susceptible d'endommager localement la continuité de la protection galvanique des fils.

Côté extrémité du hauban, l'enceinte extérieure est généralement constituée d'un capot amovible étanche fixé sur la tête d'ancrage et englobant au moins la zone de la plaque percée et des boutons. Côté câble, la gaine générale utilisée en section courante est raccordée à la tête d'ancrage par une enveloppe extérieure tubulaire, résistant à la corrosion et compatible avec les besoins de réglage du hauban.

La continuité d'étanchéité doit pouvoir être préservée dans les conditions de service du hauban (vibrations, mouvements, vieillissement, variations de température).

L'enceinte extérieure délimite au niveau de l'ancrage un milieu intermédiaire qui doit être traité conformément à 9.1.3.2. de façon à empêcher toute arrivée d'humidité ou circulation d'eau au contact des armatures.

Cette zone est injectée par un produit souple ou par une résine de coincement. L'injection de l'ancrage et de la partie courante est généralement réalisée en atelier pendant la fabrication du hauban. Elle ne peut être exécutée sur chantier que moyennant des précautions particulières pour éviter la ségrégation du zinc.

Pour s'assurer du bon remplissage du milieu intermédiaire où les fils sont très rapprochés, l'injection est effectuée en deux phases :

- première application du produit souple sur le faisceau de fils, écartés à cet effet ;
- deuxième application en fin de fabrication, après mise en place de la gaine et montage des ancrages.

10.6.4. Caractéristiques des unités courantes

Voir article 9.3.

ARTICLE 10.7. ANCRAGES F+R POUR CÂBLES DE TYPE TMC

Les haubans de catégorie TMC sont composés de fils élémentaires ronds et éventuellement de fils profilés sur les couches extérieures ; ces câbles sont décrits en détail à l'article 9.4.

10.7.1. Principe du procédé

L'ancrage F+R fonctionne par coincement des fils élémentaires du câble TMC épanouis dans une douille remplie d'un produit adhérent. Il combine l'action des deux éléments suivants, dont les détails varient selon les différents procédés de haubanage :

- une frisure (F) réalisée par l'épanouissement de tous les fils élémentaires qui sont recourbés à leur extrémité ;
- un remplissage (R) du vide, situé entre l'évidement intérieur tronconique de la douille et les fils de la frisure, par un produit rigide adhérent aux fils recourbés.

L'ensemble de la frisure et du remplissage adhérent sur la frisure constitue le culot d'extrémité. Ce culot est solidaire du câble mais peut habituellement être démoulé de l'évidement intérieur de la douille pour en permettre le contrôle. Par abus de langage, la douille est parfois appelée culot.

La conception du culot et la nature du produit de remplissage doivent assurer un blocage efficace des fils élémentaires, et garantir une résistance suffisante à la fatigue et à l'usure.

Le fournisseur du procédé doit définir dans la notice technique :

- la géométrie de l'évidement intérieur de la douille,
- les épaisseurs minimales de matière de cette douille et le matériau utilisé,
- le matériau utilisé pour le produit de remplissage,
- le mode opératoire du remplissage de la douille.

La douille est habituellement réalisée en acier protégé, soit mécanosoudé, soit moulé, soit forgé, soit usiné dans la masse selon les prescriptions du projet. Le produit de remplissage peut être soit du zinc pur, soit un alliage métallique, soit une résine chargée.

10.7.2. Liaison d'un ancrage F+R à la structure de l'ouvrage

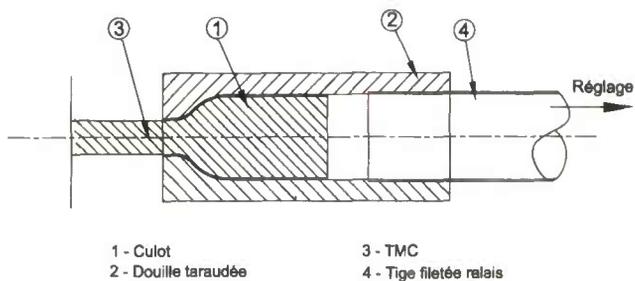
La géométrie extérieure de la douille d'ancrage s'adapte au cas par cas, en fonction des besoins du projet, afin de permettre :

- la transmission de l'effort d'ancrage du hauban à la structure environnante ;
- le réglage initial et ultérieur de la tension du hauban ;
- le réglage éventuel de l'orientation du hauban.

Les moyens de liaison des douilles couramment utilisés sont les suivants (voir figures 41 et 42) :

- douille taraudée dans l'évidement intérieur derrière le culot : ce taraudage permet l'utilisation d'une barre filetée relais ancrée à la structure par un écrou de réglage et de blocage ;
- douille filetée à l'extérieur : ce filetage permet la mise en place d'un écrou de réglage et de blocage ;
- douille chape à œil permettant de transférer, par le biais d'un axe en acier, l'effort du hauban à une plaque de liaison soudée à la structure ;
- douille à oreilles permettant l'appui de plusieurs barres filetées haute résistance avec écrous de réglage et de blocage.

DOUILLE TARAUEE AVEC TIGE FILETEE RELAIS



DOUILLE FILETEE AVEC ECROU DE REGLAGE

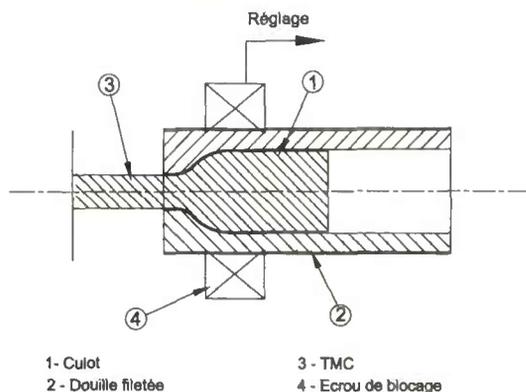
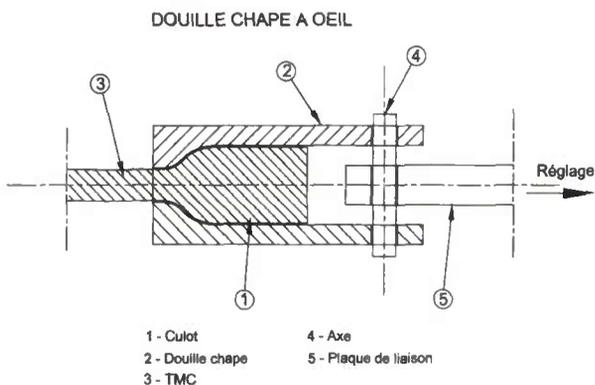
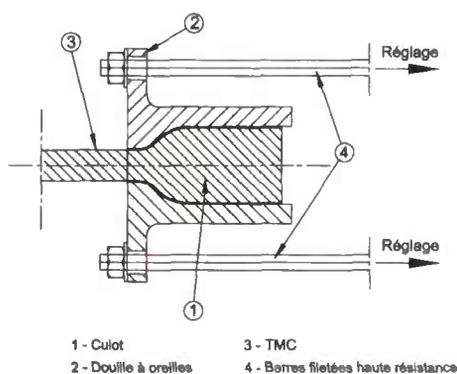


Figure 41 : différents types de douilles réglables F+R pour câbles TMC



DOUILLE A OREILLES



▲ Photo 45 : ancrage haut d'un hauban sur le pont de Seyssel

◀ Figure 42 : différents types de douilles réglables F+R pour câbles TMC (suite)

10.7.3. Dispositions de protection anticorrosion

Conformément aux principes énoncés en 10.2.3. il importe de maintenir au droit de l'ancrage la redondance des barrières anticorrosion. La continuité d'étanchéité doit pouvoir être préservée dans les conditions de service du hauban (vibrations, mouvements, vieillissement, variations de température).

La première barrière, assurée par un revêtement métallique des fils élémentaires constitutifs du câble, ne doit présenter aucune discontinuité dans le culot et la douille.

Lorsque la seconde barrière anticorrosion est une enveloppe extérieure du hauban, du type gaine plastique extrudée, sa continuité est assurée :

- par des pièces plastiques étanches reliant la zone courante et la douille,
- puis par la douille elle-même qui est habituellement en acier revêtu.

Lorsque la seconde barrière est un revêtement de type peinture ou résine, celui-ci doit être appliqué jusqu'à la douille incluse.

La continuité du produit de colmatage des vides inter-fils est assurée par le matériau de remplissage de la douille (métal ou résine) qui est en contact intime avec les fils recourbés. Toutefois, il importe de vérifier que la réalisation de ce remplissage, avec du métal en fusion notamment, ne détériore pas le produit de colmatage à proximité immédiate de l'ancrage. Cette zone est en effet la plus sollicitée en traction-flexion, lorsque aucun guide n'est prévu sur les haubans TMC.

Les douilles d'ancrage et toutes les pièces de liaison ne doivent pas constituer un point sensible au vieillissement et doivent notamment être protégées contre la corrosion.

10.7.4. Caractéristiques des unités courantes

Voir article 9.3.

Page laissée blanche intentionnellement

TROISIÈME PARTIE :
QUALIFICATION ET UTILISATION
DES PROCÉDÉS DE HAUBANAGE

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 11. ESSAIS DE QUALIFICATION D'UN PROCÉDÉ DE HAUBANAGE

ARTICLE 11.1. GÉNÉRALITÉS

La qualification d'un procédé de haubanage concerne l'ensemble du système, et s'ajoute aux essais de contrôle sur les composants individuels spécifiés par les normes, les présentes recommandations (voir chapitre 9.) ou le détenteur du procédé.

Les essais de qualification du système permettent de vérifier :

1. ses performances mécaniques, et notamment sa résistance à la fatigue ;
2. l'étanchéité de l'enceinte locale de protection anticorrosion de l'ancrage.

11.1.1 Qualification mécanique

Elle comprend :

- un essai de rupture préliminaire des armatures élémentaires, pour les haubans MTP ou MFP ;
- un essai de fatigue au cours duquel le hauban complet est soumis à l'action combinée d'une traction axiale et d'une déviation angulaire ondulées ;
- une épreuve de traction à la rupture, effectuée à l'issue de l'essai de fatigue, et destinée à évaluer l'endommagement en fatigue subi par le hauban.

Jusqu'à la date de publication du présent document, les essais de fatigue ne comprenaient généralement pas de sollicitation par déviation angulaire ondulée, à l'exception de d'essais réalisés pour le Pont de Normandie et le Second Pont sur la Severn, ainsi que d'essais de fatigue avec selle de déviation [5]. L'aptitude d'un procédé à résister aux déviations angulaires est cependant indispensable, et la vérification par un essai de fatigue permet d'éviter des justifications théoriques difficiles par calcul de contraintes de flexion correspondant aux déviations angulaires.

Toutefois, il est possible que les adaptations nécessaires sur les bancs de fatigue existants rendent cet essai difficile pendant la durée des modifications. C'est pourquoi il est prévu de tolérer des essais de fatigue réalisés avec une cale biaise (déviation angulaire fixe) pendant cette période.

11.1.2. Deux catégories d'utilisation

Deux catégories d'utilisation ont été définies, **catégorie A** et **catégorie B**, correspondant à des sollicitations mécaniques différentes :

- La catégorie B correspond à l'usage habituel sur des ponts à haubans, où les câbles sont exposés aux intempéries et soumis à des variations de tension et des charges de fatigue importantes.
- La catégorie A correspond à un **concept nouveau**, intermédiaire entre hauban et procédé de précontrainte. Ce procédé convient pour des câbles exposés aux intempéries et peut s'avérer plus économique qu'un procédé de haubanage pour des ponts dont la conception (schéma statique, rigidité du tablier, etc.) limite les variations de tension et les sollicitations de fatigue dans les câbles. C'est le cas notamment pour les câbles de précontrainte extradossée.

La définition de ces catégories d'utilisation, et la terminologie employée, sont à rapprocher des catégories de la norme NFA 35-035 (Révision 2000) pour la résistance en fatigue et en traction déviée des fils ou torons. Les règles de conception exposées à l'article 14.8. permettent de choisir la catégorie adéquate pour chaque projet.

11.1.3. Qualification de l'étanchéité

Elle consiste à vérifier que l'eau ne peut pas pénétrer dans l'enceinte locale de protection anticorrosion de l'ancrage, lorsqu'elle existe, malgré le vieillissement thermique et mécanique des matériaux. Cet essai est effectué sur un échantillon représentatif d'un hauban réel, mis en place sur un bâti d'essai spécifique.

ARTICLE 11.2. QUALIFICATION MÉCANIQUE DES HAUBANS

L'épreuve mécanique définie en 11.2.2. qualifie un procédé de haubanage complet, c'est-à-dire un couple ancrage – armature et éventuellement une selle. Un procédé doit être utilisé avec une armature pour laquelle il a été qualifié.

Il appartient à l'entreprise distributrice spécialiste de haubanage de donner la preuve que les armatures et les dispositifs d'ancrage (mors, manchons ou boutons) proposés pour un ouvrage ont des caractéristiques identiques à ceux testés lors des essais de qualification. A cet effet, les plans de fabrication et les spécifications techniques du procédé seront fournis aux instances d'homologation, qui vérifieront leur conformité avec les pièces utilisées pour les essais.

Pour utiliser sur un projet donné un procédé MTP ou MFP préalablement qualifié pour un type d'armature bien défini, avec un nouveau type d'armature, il convient d'effectuer une épreuve de convenance sur unité réduite, telle que définie en 11.2.4.

Cette épreuve de convenance est notamment nécessaire dès que l'armature proposée pour le projet provient d'un autre producteur, ou a été obtenue à partir de fil machine de qualité différente ou par un processus de fabrication modifié ou dans une autre usine de tréfilage que l'armature utilisée pour l'épreuve de qualification.

Cette épreuve de convenance est également nécessaire lorsque les dispositifs d'ancrage (mors, manchons ou boutons) proposés pour le projet diffèrent par leur conception ou leur provenance de ceux utilisés pour l'épreuve de qualification.

La constitution du câble des haubans TMC (toron multi-couches) est généralement modifiée à chaque application. Le principe d'une qualification du système sur unités complètes, suivi d'épreuves de convenance sur unités réduites n'est pas adapté à ces haubans qui doivent donc être qualifiés au cas par cas, avec la constitution du câble proposée pour chaque projet. La section 11.2.4. est donc sans objet pour les haubans TMC. Il existe cependant des torons multi-couches à fils non croisés dont la conception est figée et qui se prêtent à une qualification initiale suivie d'épreuves de convenance.

Il est à noter que les essais de fatigue sur unité complète ou réduite servent à qualifier un procédé de haubanage, mais sont difficilement exploitables pour un calcul d'endurance en fatigue des haubans d'un ouvrage donné. Lorsque ce type de calcul est nécessaire (voir chapitre 14.) il faut établir la courbe de Woehler complète du procédé de haubanage. La détermination d'une courbe de Woehler caractéristique, généralement avec un indice de confiance de 95 %, repose sur une approche statistique normalisée (ISO 3207 par exemple). Une cinquantaine d'essais de fatigue sont alors nécessaires, sur unité réduite ou monotoron. Une telle épreuve, réalisée sur l'ensemble des câbles d'un projet donné, fournit un excellent moyen de contrôle continu de la production.

11.2.1. Essai de rupture préliminaire des armatures élémentaires

Préalablement à l'épreuve mécanique, et en fonction du procédé de haubanage à qualifier, **trois** essais de traction à rupture sont effectués sur les armatures élémentaires suivantes :

- fils constitutifs des haubans MFP avec un dispositif d'ancrage de laboratoire ;
- torons constitutifs des haubans MTP avec un dispositif d'ancrage de laboratoire ;
- échantillons de toron multicouche élémentaire équipés de ses douilles d'ancrage.

Ces essais sont effectués conformément à la norme NF EN 10002-1 et permettent de déterminer les caractéristiques effectives des armatures utilisées :

- l'effort à rupture $F_{réel}$ défini comme la moyenne des trois efforts de rupture mesurés ;
- l'allongement relatif sous charge maximale A_{gt} défini comme la moyenne des trois allongements relatifs mesurés.

Pour les haubans MFP et MTP, on définit la résistance effective de l'armature comme la contrainte $f_{réel}$ calculée en divisant l'effort $F_{réel}$ par la section nominale du fil ou du toron..

La résistance effective de l'armature $f_{réel}$ peut être sensiblement meilleure que la classe de résistance (ou contrainte de rupture garantie) f_{rg} requise par les normes.

Pour les haubans TMC, on définit la résistance effective des fils comme la contrainte $f_{réel}$ calculée en divisant l'effort $F_{réel}$ par la section nominale du toron multicouche, définie comme la somme des sections droites nominales des fils constitutifs.

La résistance effective $f_{réel}$ diffère de la classe de résistance f_{rg} (ou force de rupture garantie) des fils indiquée par les normes, notamment en raison de la perte au comettage. Cette perte est de l'ordre de 4 à 10% en fonction du pas de toronnage des différentes couches de fils.

11.2.2. Epreuve mécanique de qualification

11.2.2.1. Dimensions des échantillons testés

Trois unités représentatives sont testées selon le mode opératoire indiqué ci-après.

Pour les haubans MFP et MTP, ces unités sont représentatives d'une gamme, dont le plus grand ancrage comporte n armatures élémentaires, pourvu que les échantillons respectent les conditions suivantes :

- toutes les alvéoles coniques disponibles dans chaque échantillon sont utilisées ;
- la capacité à rupture de chaque échantillon est supérieure à 7000 kN ;
- au moins six fils ou torons de chaque unité testée présentent les déviations les plus défavorables de la gamme ;
- la plus grande unité MTP testée comporte au moins le nombre n' de torons, défini ainsi :
 - si $27 < n < 219$, alors $n' = 27 + (n - 27) / 3$
 - si $n > 219$, alors $n' = 91$
- la plus grande unité MFP testée comporte au moins le nombre n' de fils, défini ainsi :
 - si $121 < n < 1021$, alors $n' = 121 + (n - 121) / 3$
 - si $n > 1021$, alors $n' = 421$

Pour les haubans TMC, les unités représentatives doivent couvrir la gamme de torons proposée pour l'ouvrage et comprennent au moins une fois l'unité la plus puissante du projet. Si les torons sont utilisés en faisceau fermé avec collier de déviation aux ancrages, cette configuration doit être testée par un montage représentatif.

Sous réserve que les différentes unités soient définies par des règles de similitude géométrique portant notamment sur la déviation angulaire des armatures dans l'ancrage, la capacité de l'unité n'a quasiment pas d'influence sur la performance du procédé de haubanage. Toutefois, il importe de tester des unités de taille suffisante pour que les essais soient statistiquement significatifs. Les valeurs indiquées sont également compatibles avec la capacité des bancs de fatigue actuellement disponibles.

La longueur de chaque échantillon testé ne sera pas inférieure à **5 mètres**.

Chaque échantillon testé comprend tous les dispositifs réels d'ancrage, les accessoires de protection anticorrosion ainsi que les produits d'injection éventuels. Des dispositions adéquates reproduisent les conditions d'appui des ancrages sur les ouvrages réels. Si le procédé de haubanage utilise des ancrages actifs et passifs différents (par exemple ancrage passif à manchons et ancrage actif à clavettes), il convient de tester les deux ancrages simultanément.

Les procédés de haubanage MFP et MTP, et parfois aussi TMC en faisceau, utilisent généralement un collier de déviation placé à une certaine distance de l'ancrage et permettant l'épanouissement des armatures, de la zone courante vers l'ancrage (voir chapitre 10.) Sur l'échantillon, ce collier est placé au plus à la distance de l'ancrage spécifiée par le procédé de haubanage.

Dans les ouvrages réels, le collier de déviation peut être lié rigidement à la structure ou flottant, par exemple lorsqu'il est relié à la structure par un manchon élastique ou un amortisseur visqueux. Comme il n'est pas envisageable de reproduire exactement les conditions particulières de chaque ouvrage dans l'essai de qualification, la configuration de guidage transversal la plus défavorable est adoptée, c'est-à-dire celle du collier complètement flottant sans aucun amortissement.

11.2.2.2. Mode opératoire de l'essai de fatigue

Après installation de l'échantillon sur le banc d'essai, 5 à 10 cycles (ou éventuellement un nombre plus important en fonction des souhaits du demandeur) sont effectués entre $\sigma_{\max}/2$ et σ_{\max} pour stabiliser les éléments du système. Ces cycles ne sont pas décomptés des deux millions de cycles d'essai.



Photo 46 : banc d'essai de fatigue du LCPC

L'échantillon subit ensuite **deux millions** de cycles des sollicitations indiquées ci-dessous :

Catégorie d'utilisation	Catégorie B (hauban)	Catégorie A (précontrainte extradosée, etc.)	Précontrainte extérieure (pour mémoire)
Etendue axiale $\Delta\sigma$	200 MPa	140 MPa	80 MPa
Etendue angulaire $\Delta\alpha$	10 mrad	0	0
σ_{\max}	0,45 f_{rg}	0,55 f_{rg}	0,65 f_{rg}
α_{\max}	10 mrad	0	0
σ_{\min}	0,45 f_{rg} - 200 MPa	0,55 f_{rg} - 140 MPa	0,65 f_{rg} - 80 MPa
α_{\min}	0 mrad	0	0

NOTA : les contraintes σ_{\max} indiquées correspondent aux valeurs standard des essais de fatigue actuellement pratiqués, et ne sont pas nécessairement identiques aux contraintes maximales autorisées sous charges de service (voir chapitre 14.)

Les catégories A et B ont été définies par référence à la norme NF A 35-035.

La contrainte axiale varie sinusoïdalement entre σ_{\min} et σ_{\max} avec une amplitude $\Delta\sigma / 2$. Simultanément, le câble subit une déviation par rapport à l'axe de l'ancrage variant sinusoïdalement entre α_{\min} et α_{\max} avec une amplitude $\Delta\alpha / 2$.

Si cela est possible sur le banc d'essai, les maxima (respectivement les minima) de contrainte sont synchronisés avec les maxima de déviation angulaire. En l'absence de mécanisme d'asservissement sur le banc d'essai, la fréquence d'oscillation angulaire doit être supérieure de quelques pour cents à la fréquence de variation de contrainte, de façon à obtenir des combinaisons aléatoires de sollicitations axiale et angulaire.

La réalité des sollicitations axiales et angulaires sur un hauban est aléatoire plutôt que synchronisée.

En fonction du laboratoire d'essai, différents types de montage sont utilisés pour exercer les sollicitations en contrainte et en déviation angulaire :

- Montage rectiligne, la déviation angulaire étant obtenue au moyen d'un déplacement transversal du câble au milieu de l'échantillon (figure 43). Ce déplacement transversal Δh est calculé en considérant que la rotation du câble s'effectue autour de la sortie de l'ancrage.
- Montage muni d'une selle de déviation (figure 44). La simultanéité des sollicitations axiale et angulaire est garantie. La configuration géométrique du montage est calculée pour obtenir les sollicitations souhaitées.

Les conditions d'appui sur le banc d'essai interdisent généralement toute rotation des ancrages. Les colliers de déviation des fils ou torons étant volontairement laissés flottants, la déviation angulaire du câble s'effectue par rapport à la face de sortie de l'ancrage, où se trouve le dispositif d'étanchéité éventuel.

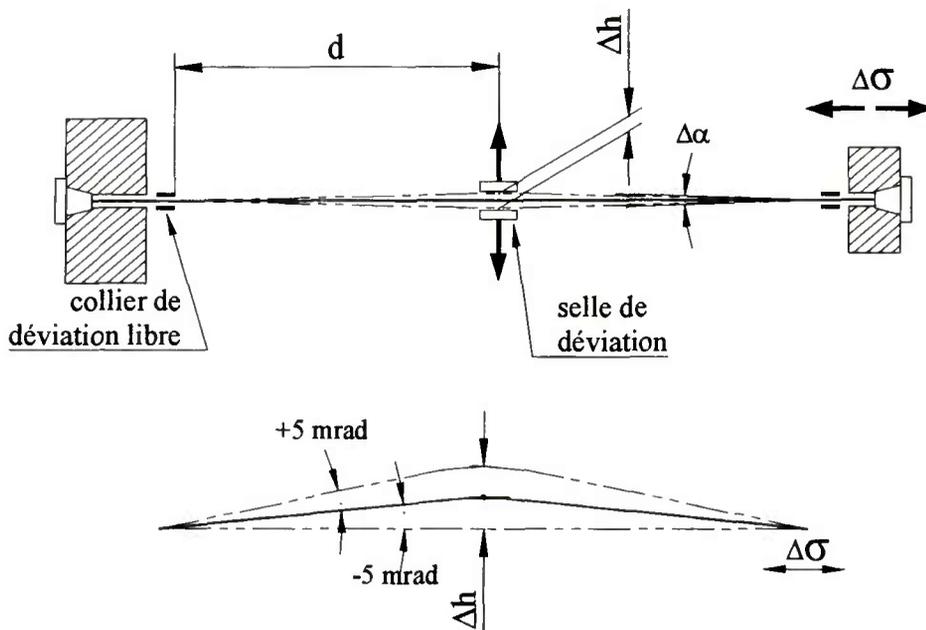


Figure 43 : montage d'essai rectiligne avec dispositif de déviation

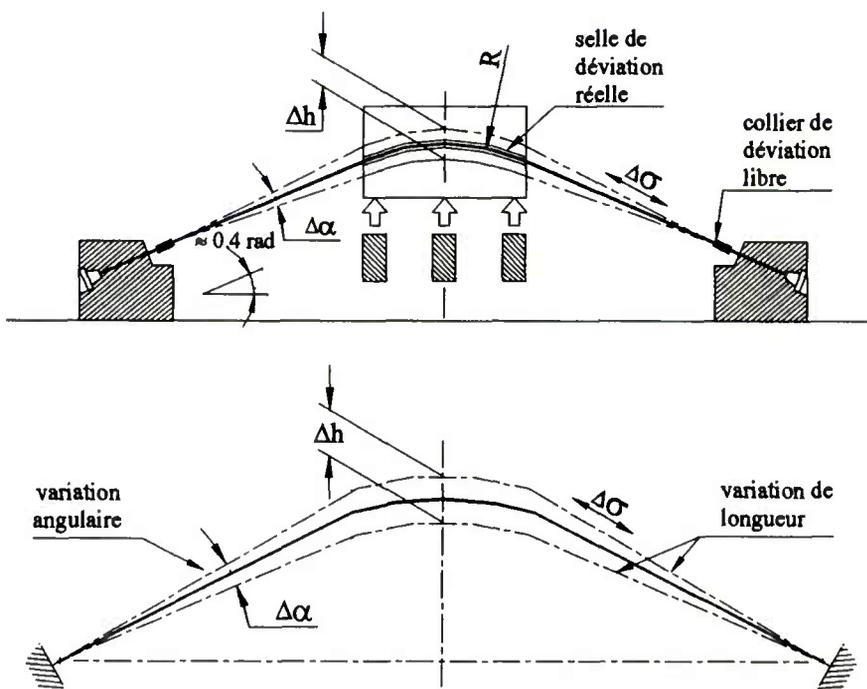


Figure 44 : montage d'essai avec selle de déviation

Pour laisser le temps aux laboratoires d'effectuer les adaptations nécessaires sur les bancs de fatigue, il est prévu d'accepter, pendant une période de transition, les essais de fatigue pour lesquels la déviation angulaire ondulée de 5 ± 5 mrad serait remplacée par une déviation angulaire constante de 10 mrad.

Cette déviation angulaire peut être obtenue par une cale biaise placée entre l'ancrage et le bloc d'essai, les colliers de déviation des fils ou torons étant laissés flottants. Il est recommandé d'équilibrer la tension des torons après mise en place de la cale biaise, et de la conserver pendant l'essai de traction à rupture.

La fréquence d'essai ne doit pas dépasser 10 Hertz. L'effet de stabilisation des ancrages (perte du niveau moyen de sollicitation liée à la déformation axiale de la tête) doit être compensé dès qu'il atteint 1 % de la charge maximale d'essai.

Un dispositif permet de détecter les ruptures des armatures ou pièces d'ancrage pendant tout l'essai. Les chutes de charge liées aux ruptures sont notées, ainsi que le nombre de cycles auquel se produisent ces ruptures. Un dispositif suit les déformations longitudinales de l'échantillon et de ses ancrages en fonction du temps.

L'essai de fatigue est concluant si :

- l'échantillon subit deux millions de cycles de sollicitation axiale sans rupture détectée de plus de **2 %** des fils constitutifs du hauban ;
- la longueur moyenne de l'échantillon se stabilise après 100 000 cycles et ne varie pas de plus de **5 millimètres** au cours des deux millions de cycles.

Dans la mesure du possible, on effectue alors à une inspection visuelle des pièces d'ancrage et des armatures, ainsi qu'un contrôle par ressuage pour détecter les fissurations éventuelles.

11.2.2.3. Mode opératoire de l'essai de traction à la rupture

L'essai de traction à la rupture s'effectue à la suite de l'essai de fatigue, par mise en charge de l'échantillon. Si un transfert de l'échantillon entre le banc de fatigue et le banc de traction est nécessaire, il convient d'éviter tout déplacement des pièces d'ancrage au cours de la manœuvre. Aucune intervention sur les dispositifs d'ancrages (douille, mors, manchons ou boutons) n'est autorisée avant l'essai de traction.

Le chargement s'effectue à une vitesse de déformation constante inférieure à $3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. L'utilisation d'un dispositif permettant de détecter les ruptures en cours d'essai est recommandée. La courbe effort – déformation (ou la courbe effort – distance entre ancrages) est enregistrée en cours d'essai.

Le chargement est interrompu lorsque la charge maximale est atteinte, et peut être poursuivi jusqu'à rupture partielle ou totale du câble ou de l'un des ancrages. L'essai de traction à la rupture est concluant si :

- L'échantillon résiste à un effort supérieur à la plus grande des deux valeurs :
 - **95 %** de la force de rupture garantie F_{rg} du câble, définie à partir des caractéristiques nominales des armatures (pour les haubans MFP et MTP seulement) ;
 - **92 %** de la force réelle $F_{r\text{éel}}$ du câble, calculée à partir de la contrainte $f_{r\text{éel}}$ mesurée en 11.2.1.
- L'allongement de l'échantillon sous charge maximale est supérieur à **1,5 %**, déduction faite des déformations inhérentes au fonctionnement des ancrages (rentrée de clavettes, etc.)

Ces minimums sont identiques pour les catégories A et B.

Après essai et dépose du corps d'épreuve, les déformations et ruptures (partielles ou totales) des différents éléments constitutifs du hauban sont relevées. Aucune rupture ou fissure détectable par ressuage ne doit affecter les pièces majeures du dispositif d'ancrage (tête d'ancrage, culot, système de déviation, etc.) Le caractère nocif des déformations permanentes est jugé au regard de leurs conséquences sur la stabilité des ancrages à long terme, et sur la démontabilité après chargement ultime.

11.2.3. Compte-rendu de la qualification mécanique

Le procès verbal des essais de rupture préliminaires et de l'épreuve de qualification mécanique fait apparaître :

- la notice technique du procédé testé, et notamment les plans définissant la géométrie des pièces d'ancrage ;
- les caractéristiques géométriques et mécaniques réelles des composants de l'échantillon (fils ou torons). La provenance des armatures et leur certificat de contrôle.
- le descriptif du dispositif d'essai avec un plan ;
- le descriptif du montage du corps d'épreuve sur le banc de fatigue et des systèmes de mesure et contrôle utilisés ;
- les résultats des essais statiques sur armatures, indiquant notamment les valeurs $F_{réel}$ et A_{gt} mesurées, ainsi que la résistance effective $f_{réel}$ des armatures ;
- les enregistrements numériques de l'essai de fatigue, et notamment le résultat des cycles de stabilisation (nombre de cycles, perte de charge, mouvement des pièces d'ancrage, etc.), l'évolution de la longueur de l'échantillon ainsi que les moments où se sont produites des ruptures de fils ;
- les enregistrements de l'épreuve de traction à rupture, et notamment la courbe effort – déformation, la charge maximale atteinte, la déformation effective du câble sous charge maximale, la charge et l'allongement pour lesquels des ruptures (armatures ou pièces d'ancrage) ont été détectées ;
- les mesures et observations (photos) effectuées sur l'échantillon après l'épreuve, comprenant en particulier celles des déformations permanentes.

11.2.4. Epreuve de convenance sur unités réduites (haubans MFP et MTP)

L'épreuve de convenance permet de démontrer la compatibilité d'un **ancrage préalablement qualifié** avec l'armature proposée pour un ouvrage, en reproduisant les conditions de contact sur l'armature (mors, manchons ou boutons) ainsi que les déviations angulaires. Cette épreuve de convenance est effectuée sur des unités réduites, avec des bancs d'essai de faible capacité, plus disponibles que les bancs de fatigue nécessaires pour les unités complètes.

Une unité réduite comprend au minimum **trois** armatures élémentaires, toutes les alvéoles coniques disponibles dans l'ancrage n'étant pas nécessairement utilisées. Les armatures testées présentent les déviations les plus défavorables de la gamme.

Au moins deux armatures élémentaires sont nécessaires pour reproduire les déviations angulaires dans l'ancrage. Mais en pratique, pour des raisons d'équilibrage et de symétrie, il faut plutôt trois armatures élémentaires pour effectuer un essai de fatigue respectant le tracé des armatures dans l'ancrage.

En fonction de l'importance du projet, **un à trois** essais de fatigue sur unités réduites sont effectués pour valider l'emploi d'armatures ou dispositifs d'ancrage (mors, manchons ou boutons) différents de ceux de l'essai de qualification initial. L'épreuve de convenance consiste donc en :

- 1 - Trois essais de rupture préliminaires sur des échantillons de l'armature proposée pour le projet.
- 2 - Un à trois essais de fatigue suivant le même mode opératoire que celui de l'essai de fatigue sur unité complète à deux exceptions près :
 - l'unité réduite n'est pas soumise à des cycles de déviations angulaires ;
 - l'essai est concluant si **aucun fil** n'est rompu après deux millions de cycles de sollicitation axiale.
- 3 - Un à trois essais de traction à la rupture réalisés après les essais de fatigue et jugés selon les mêmes critères que l'essai sur unité complète.

ARTICLE 11.3. QUALIFICATION DE L'ÉTANCHÉITÉ DES HAUBANS

11.3.1. Justification de l'essai

Les barrières de protection en partie courante sont qualifiées par des essais de vieillissement accélérés adéquats (brouillard salin pour le dépôt de protection métallique ou rayons ultraviolets pour les gaines en PEHD et autres accessoires ou revêtements non métalliques) tels que définis au chapitre 9. L'essai d'étanchéité décrit dans le présent article permet de vérifier la performance des dispositions prises contre la pénétration d'eau et le traitement de l'humidité (condensation) au droit des points singuliers que constituent les raccordements aux ancrages.

Deux points importants ont été pris en considération dans la définition de cet essai :

- les effets d'échelle jouent un rôle considérable, si bien que la qualification du procédé doit être menée sur un échantillon en vraie grandeur ;
- les dispositifs d'étanchéité sont sensibles au vieillissement. Les principales causes de vieillissement sont mécaniques et thermiques. Le vieillissement chimique n'a pas été incorporé dans cet essai, pour des raisons pratiques et parce que les dispositifs d'étanchéité ne sont pas directement soumis à l'action des rayons ultraviolets.

L'essai d'étanchéité concerne principalement les haubans modulaires MFP ou MTP, pour lesquelles la barrière extérieure courante est remplacée par une enceinte locale au niveau de l'ancrage. Il permet de vérifier que, malgré un vieillissement artificiel des dispositifs d'étanchéité par des sollicitations mécaniques et thermiques, aucune trace d'eau ne peut pénétrer dans l'enceinte locale protégeant l'ancrage.

Malgré le soin apporté à la définition de cet essai, les conditions d'essai ne reflètent qu'imparfaitement la réalité. La pertinence de cet essai doit être attestée par un retour d'expérience.

Dans le cas des haubans TMC, la seconde barrière anticorrosion peut se présenter sous la forme d'une gaine PEHD extrudée sur le toron multi-couches ou d'une gaine enveloppe du faisceau de monotorons. Cette gaine doit être raccordée de manière étanche au culot ou à la plaque d'ancrage et l'essai d'étanchéité ci-dessous peut être facilement adapté pour vérifier l'étanchéité de l'ensemble.

11.3.2. Bâti d'essai

Un bâti d'essai spécifique a été conçu pour l'essai d'étanchéité (voir figure 45) :

- tube en acier de longueur 4,00 m, diamètre 0,50 m et épaisseur suffisante pour supporter un effort de compression de 3500 kN centré ou 2000 kN excentré de 100 mm ;
- ce tube est monté sur un bâti incliné de 30° sur l'horizontale. Il est muni à son extrémité inférieure d'une plaque d'appui percée, permettant la mise en place de l'ancrage de hauban à tester ;
- à l'autre extrémité, une plaque d'appui similaire comporte en plus une surface de glissement PTFE-Inox permettant de déplacer transversalement l'ancrage supérieur à l'aide d'un petit vérin fixé sur le tube. Ce vérin transversal a une capacité de $2000 \times 5 \% = 100 \text{ kN}$;
- après mise en place de l'échantillon, le tube sera rempli d'eau sur presque toute sa hauteur. Un circuit de chauffage de type "chauffage central" permet de chauffer cette eau à une température de 70°C. Un système permet de contrôler l'évolution du niveau d'eau dans le tube (par exemple, tube transparent parallèle et en dérivation sur le tube métallique).

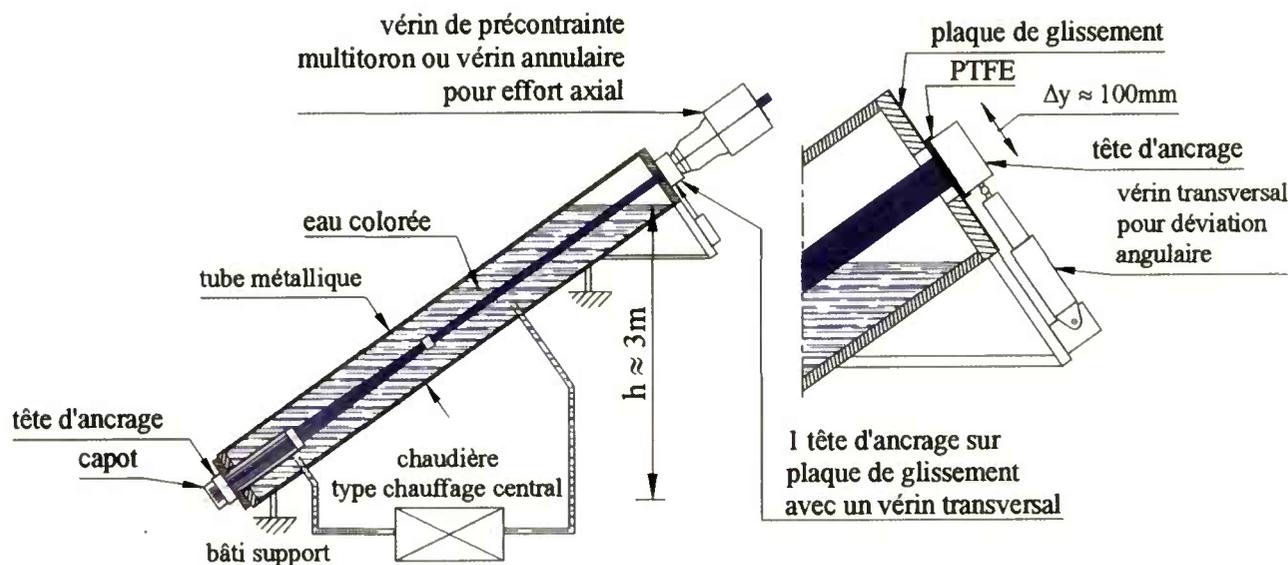


Figure 45 : bâti d'essai d'étanchéité

11.3.3. Mode opératoire de l'essai d'étanchéité

11.3.3.1. Préparation de l'échantillon

L'échantillon testé est un ancrage inférieur de hauban dans des conditions proches de la réalité : unité de capacité 7000 kN (soit 27 T15 dans le cas d'un hauban MTP) munie de tous ses accessoires. L'extrémité supérieure est un ancrage permettant la mise en tension du câble et le raccordement de la gaine éventuelle.

L'ancrage supérieur étant placé à l'axe du tube, le câble est installé dans le bâti d'essai, puis mis en tension à un effort de $0,10 F_{rg}$. Des indicateurs d'humidité en papier buvard sont placés sur chaque armature, ainsi qu'en tout point sensible de l'enceinte locale où l'eau ne doit pas pénétrer.

Tous les dispositifs de déviation ou d'étanchéité sont mis en place (capots, gaine et raccords, joints, presse-étoupe, etc.) puis le hauban est injecté dans les conditions réelles, notamment pour ce qui concerne l'inclinaison et la position des points d'injection et de rejet.

Dans le cas de haubans MFP ou MTP, le collier de déviation éventuel est placé à la distance minimale de l'ancrage spécifiée par le procédé, et laissé flottant transversalement.

Dans le cas de haubans MFP et MTP collectivement protégés, la gaine extérieure est reliée de façon étanche aux deux ancrages du hauban, délimitant une enceinte étanche unique sur l'ensemble du câble. Il convient de rétablir les mêmes conditions de liaison sur la gaine de l'échantillon, afin de vérifier l'innocuité des variations de température sur les raccords. Inversement, il n'est pas indispensable de mettre en place la gaine extérieure des haubans MTP individuellement protégés, lorsque celle-ci n'a pas vocation à être une barrière étanche.

11.3.3.2. Vieillesse mécanique et thermique

On applique la séquence de vieillissement suivante, sur une période de 6 semaines environ (voir figure 46) :

1. On effectue 10 cycles de charge et décharge entre $0,2$ et $0,5 F_{rg}$, au moyen d'un vérin multitorion ou annulaire placé à l'ancrage supérieur, à température ambiante ($20^{\circ}\text{C} \pm 5$), sur une durée de quelques heures.

2. Le câble est ancré à un effort de $0,30 F_{rg}$ qui sera maintenu pendant toute la suite de l'essai. Après colmatage des fuites éventuelles entre l'ancrage et la plaque d'appui, le tube est rempli d'eau jusqu'à un niveau de 100 mm sous la plaque d'appui supérieure (soit une pression d'eau sur l'ancrage inférieur de l'ordre de 0,2 bar). On utilise de l'eau potable, non salée, colorée en rouge à l'aide d'un colorant adéquat.
3. On attend une semaine en laissant l'eau stagnante, à température ambiante (semaine S1).
4. Pendant les quatre semaines suivantes, on effectue au moyen du circuit de chauffage de l'eau des cycles thermiques de 3,5 jours de période et 50°C d'amplitude (deux cycles par semaine) :
 - montée en température sur une demi-journée ;
 - maintien de la température de $70^{\circ}\text{C} \pm 5$ pendant 24 heures ;
 - descente en température sur une demi-journée ;
 - maintien de la température ambiante de $20^{\circ}\text{C} \pm 5$ pendant 24 heures.
5. Simultanément, 250 cycles de déviation angulaire sont effectués chaque semaine, à une fréquence de 0,1 Hz environ en utilisant le vérin transversal (cela prend environ 1 heure). Ces cycles ont une étendue de 200 mm (soit 100 mm d'amplitude, ce qui équivaut à un angle de 30 mrad environ) et sont effectués à température ambiante ou à chaud :
 - semaine S2 : 250 cycles à température ambiante ;
 - semaine S3 : 250 cycles à $70^{\circ}\text{C} \pm 5$;
 - semaine S4 : 250 cycles à température ambiante ;
 - semaine S5 : 250 cycles à $70^{\circ}\text{C} \pm 5$.
6. On attend une semaine en laissant l'eau stagnante, à température ambiante (semaine S6).
7. Fin de la séquence de vieillissement et détension du câble.

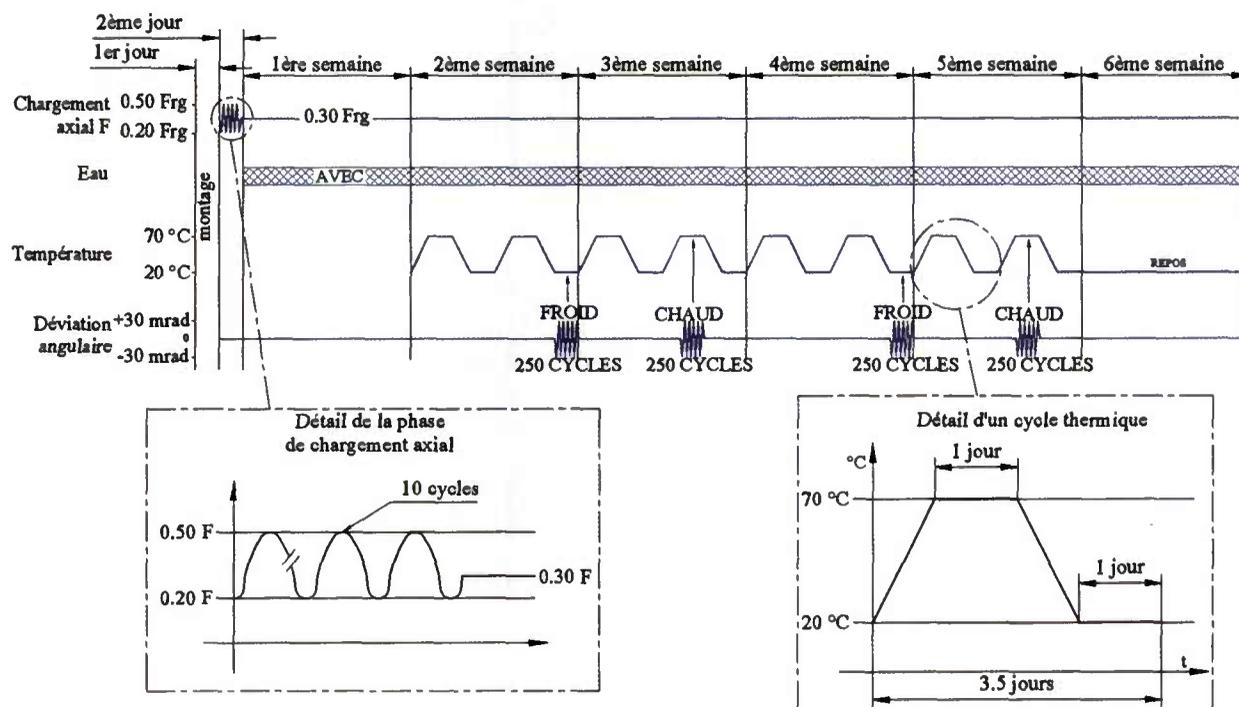


Figure 46 : mode opératoire de l'essai d'étanchéité

11.3.3.3. Jugement de l'essai d'étanchéité

Après vidange du tube, on dépose le hauban en prenant garde de ne pas souiller l'ancrage.

Après séchage, on procède au démontage des pièces d'ancrage. Le produit d'injection éventuel est retiré de l'enceinte locale, en recherchant toute trace d'eau colorée sur les marqueurs.

L'essai est jugé concluant si aucune trace d'eau colorée n'est détectée dans l'enceinte ni dans le produit d'injection.

CHAPITRE 12. INSTALLATION DES HAUBANS

La mise en œuvre d'un hauban dépend du type de câble et d'ancrage utilisé, mais pour fixer les idées, elle sera décrite selon les quatre étapes suivantes :

1. façonnage et mise à longueur initiale du câble ;
2. installation du hauban sur l'ouvrage ;
3. mise en tension et réglage du hauban ;
4. protection anticorrosion définitive.

Les étapes 1. 2. et 3. sont souvent confondues pour les haubans MTP ancrés par clavettes.

ARTICLE 12.1. ASPECTS ORGANISATIONNELS

12.1.1. Entreprise distributrice spécialisée

La durabilité d'un hauban dépend fortement de la qualité de sa mise en œuvre. C'est pourquoi celle-ci doit être exécutée en totalité par le fournisseur du procédé de haubanage, désigné par la suite **entreprise distributrice spécialisée** ou **EDS**.

Il est fortement déconseillé de séparer les prestations de fourniture et d'installation des haubans, notamment pour les raisons suivantes :

- *sécurité du personnel d'exécution ;*
- *qualité de la prestation technique ;*
- *responsabilité juridique en cas de sinistre.*

L'EDS intervient souvent comme sous-traitant de l'entreprise générale. Ce sous-traitant doit être précisé très en amont des travaux, si possible dès la réponse à l'appel d'offres.

Pour les ouvrages haubanés exceptionnels, il peut être intéressant de faire intervenir l'EDS comme un co-traitant de l'entreprise générale (lots conjoints). Cette disposition présente notamment deux avantages : l'EDS est nommément désignée dans l'offre, et le contrat qui la lie directement au maître de l'ouvrage clarifie sa responsabilité.

Une préparation suffisante du chantier de haubanage, ainsi qu'une étroite collaboration de l'EDS avec l'entreprise générale (bureau des méthodes et bureau d'études techniques ou ingénieur conseil) sont nécessaires.

La fourniture et l'installation des haubans sont souvent intimement imbriquées avec le cycle de construction de l'ouvrage et font appel à des méthodes beaucoup plus spécialisées que les autres sous-traitants ou fournisseurs. Les imprévus sur l'installation des haubans peuvent gravement retarder l'exécution de l'ouvrage.

12.1.2. Chargé de la mise en œuvre des haubans

L'ensemble de l'installation d'un hauban est effectué sous la direction d'un responsable spécialement qualifié, appelé **chargé de la mise en œuvre des haubans** ou **CMH**. Le CMH est formé par l'EDS au cours d'un stage théorique et pratique sur le matériel prévu et homologué par l'autorité d'approbation compétente (approval body).

Le CMH a une mission analogue au chargé de la mise en œuvre de la précontrainte (CMP) pour les câbles de précontrainte.

ARTICLE 12.2. FOURNITURE

12.2.1. Conditions de livraison et de stockage

Les composants individuels des haubans sont livrés, manipulés et stockés de manière à éviter toute altération.

Les pièces vulnérables à l'oxydation sont munies d'une protection anticorrosion, provisoire ou définitive. Elles sont stockées à l'abri de l'humidité. En cas de stockage de longue durée (supérieure à deux mois), la protection temporaire doit être vérifiée et éventuellement renouvelée.

Les pièces vulnérables au rayonnement ultraviolet sont protégées des rayons directs du soleil, soit par leur emballage, soit par tout autre moyen adapté.

Les composants des gaines en PEHD sont livrés de la façon suivante :

- éléments droits de longueur 12 m environ ;
- dans certains cas, et pour les diamètres inférieurs à 70 mm, bobine enroulée. Le diamètre d'enroulement est alors au moins égal à 30 fois le diamètre extérieur de la gaine. En outre, il convient de respecter un mode opératoire adapté pour dérouler les bobines à des températures inférieures à 5°C, pour éviter la fissuration des gaines.

12.2.2. Acceptation des lots d'armatures

Il convient de conserver une traçabilité complète de la provenance des matériaux, en indiquant notamment, pour chaque lot d'armature :

- l'origine du fil machine (sidérurgiste et numéro de la coulée) ;
- l'identité de l'usine et le processus de tréfilage ;
- la traçabilité sur chaque fil constitutif des TMC.

En plus des essais de qualification du procédé de haubanage, les lots d'armature subissent les essais de conformité indiqués par les normes :

- NF A 35-035 (torons et fils galvanisés pour haubans MTP ou MFP) ;
- NF XPA 35-036 (fils pour torons TMC).

Ces essais sont réalisés avec les fréquences suivantes :

Fréquence	Essais
au moins trois essais par coulée, avec un minimum de trois essais par 200 t de fil machine	- essai de fatigue - essai de traction déviée (one pin test) pour les torons à 7 fils
au moins un essai par bobine livrée sur chantier, avec un minimum de un essai par 4 t	essai de traction, pour déterminer f_{rg} , A_{gt} et module d'Young E

Lorsqu'un essai n'est pas concluant, deux nouveaux échantillons sont testés. Si les deux essais de contrôle successifs ne sont pas concluants, le lot est rejeté.

12.2.3. Acceptation des pièces d'ancrage

L'EDS met en place chez ses fournisseurs un système de contrôle des pièces d'ancrage.

Les principaux contrôles à réaliser concernent :

- l'intégrité des blocs ou des douilles d'ancrages (contrôles par ultrasons, magnétoscopie ou gammagraphie de toutes les pièces) ;
- la conformité des mors d'ancrage aux spécifications du procédé, pour les haubans MTP.

ARTICLE 12.3. FAÇONNAGE DES HAUBANS

La préparation et l'assemblage des composants individuels (armatures élémentaires, conduits, têtes d'ancrage, etc.) peuvent être effectués en atelier pour les haubans préfabriqués, ou directement sur l'ouvrage pour les haubans MTP ancrés par clavettes.

12.3.1. Façonnage des haubans en atelier

12.3.1.1. Préparation des haubans MTP à ancrages M ou C

Description :

Les haubans multi-torons à manchons sertis sont préparés dans un atelier selon les étapes suivantes :

1. coupe des torons élémentaires à la longueur nécessaire sur un banc de préparation ;
2. enfilage du faisceau de torons dans la gaine collective éventuelle, et passage dans les trous des deux têtes d'ancrage ;
3. réalisation de l'ancrage par sertissage à froid des manchons aux extrémités des torons ;
4. fixation temporaire des tubes télescopiques et injection éventuelle au produit souple.



Photos 47 et 48 : préparation des haubans du stade de France

Un mode opératoire identique peut être utilisé pour préfabriquer les haubans multi-torons à clavettes. Dans ce cas, le maintien des clavettes avant mise en charge du hauban est assuré par un dispositif de préblocage adéquat, permettant d'éviter tout glissement de toron.

Des disposition adéquates doivent garantir le parallélisme des torons sur toute la longueur du hauban, et leur ancrage dans des trous correspondants des deux têtes d'ancrage.

12.3.1.2. Préparation des haubans MFP

Description :

La préfabrication d'un haubans MFP se déroule en atelier, selon les étapes suivantes :

1. coupes des fils d'acier sur un banc automatique ;
2. mise en place du premier ancrage et boutonnage des fils ;
3. première application du produit de remplissage sur le faisceau de fils ;
4. ligature hélicoïdale du faisceau puis enfilage dans sa gaine PEHD ;
5. mise en place du second ancrage et boutonnage des fils ;
6. coulage de la résine dans les douilles mise en position verticale ;
7. fixation temporaire des tubes télescopiques et injection complémentaire au produit souple ;
8. stockage du hauban sur bobine, par enroulage et torsadage (un pas par tour sur la bobine).

Des dispositions adéquates doivent garantir le parallélisme des fils sur toute la longueur du hauban, et leur ancrage dans des trous correspondants des deux têtes d'ancrage.



Photo 49 : préparation d'un hauban MFP

12.3.1.3. Préparation des haubans TMC

Description :

Pour les haubans de type TMC l'assemblage des armatures élémentaires a lieu en usine lors de l'opération de toronnage, avec application simultanée du produit de remplissage des vides interfilaires.

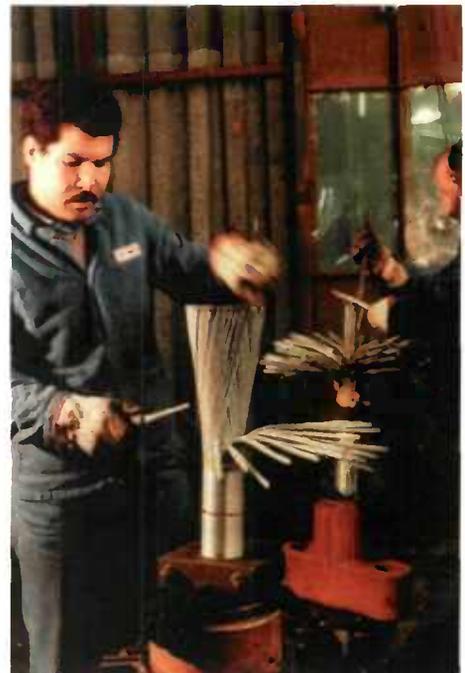
Le TMC est généralement préfabriqué avec au moins une des deux douilles d'ancrages. Le second culot peut être coulé sur chantier.

La préfabrication comprend également l'extrusion éventuelle d'une gaine extérieure sur le câble toronné.



▲ Photo 50 : hauban TMC préfabriqué avec ses douilles d'ancrage.

Photo 51 : préparation des douilles d'ancrage



Les opérations de culottage en usine ou sur chantier font l'objet de procédures détaillées de mise en œuvre et de contrôle.

12.3.2. Mise à longueur

La mise à longueur des haubans préfabriqués se fait en atelier ou sur le site, mais dans tous les cas avant l'installation et la mise en tension. L'EDS doit mettre en place des moyens de contrôle géométrique permettant de satisfaire aux exigences suivantes :

- la longueur entre ancrages du hauban assemblé doit être déterminée avec une précision adaptée au système de réglage ;
 - la dispersion des longueurs respectives des fils ou torons doit respecter une certaine tolérance.
- Les tolérances sur la longueur du hauban et la dispersion entre armatures sont définies par l'EDS en fonction des aptitudes de réglage du procédé et des conditions de pose.

La mise à longueur des haubans TMC doit être effectuée après une pré-tension, sur un banc adapté à cet effet.

Pour obtenir une précision de 1 à 2 % sur la tension finale uniquement par la mise à longueur du hauban, une précision relative de 0,005 % (soit 5 mm sur un câble de 100 m) est nécessaire (voir section 7.2.5.)

L'emploi du chalumeau oxyacétylénique est interdit pour la coupe des armatures.

12.3.3. Assemblage des gaines

Lorsque le conduit extérieur est composé de tronçons assemblés longitudinalement, les assemblages doivent satisfaire aux mêmes critères qu'un tronçon unique en ce qui concerne l'étanchéité et garantir une résistance mécanique à la traction supérieure à 0,9 fois celle d'un tronçon courant.

La démonstration de l'efficacité d'un assemblage ou d'un raccord mécanique est effectuée par le fournisseur du procédé de haubanage. Elle peut résulter soit d'essais de convenance, soit de références antérieures.

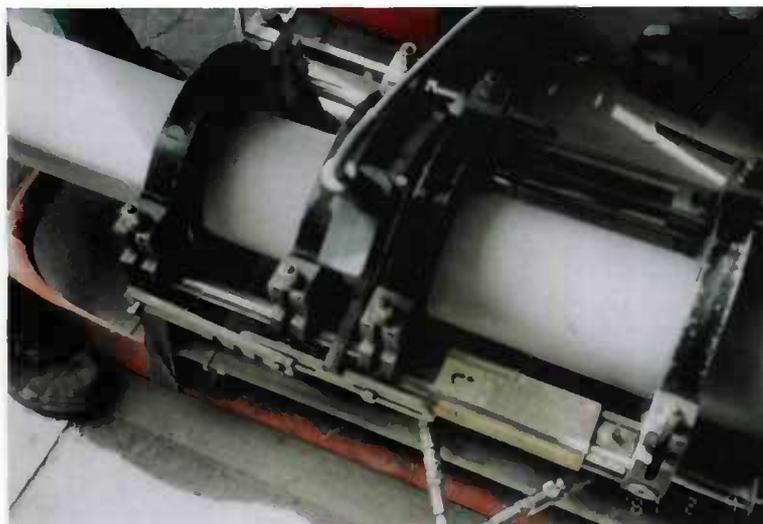


Photo 52 : soudage au miroir

La longueur de gaine mise en place est déterminée de façon irréversible avant l'enfilage des armatures. Elle doit satisfaire aux exigences suivantes :

- compatibilité avec les besoins d'enfilage des armatures (accès à l'intérieur de la gaine), de mise en tension et de réglage du câble (éventuel débattement en longueur lors de la mise en tension) ;
- continuité de la protection anticorrosion sur le hauban terminé ;
- compatibilité avec les variations de température :
 - prise en compte de la température lors de la mise à longueur de la gaine.
 - prise en compte des températures maximale et minimale dans le calcul du débattement en longueur de la gaine achevée.

Ces exigences impliquent généralement l'emploi de dispositifs télescopiques ou de manchettes.

12.3.4. Livraison sur le chantier

Description :

Si l'atelier de façonnage des haubans ne se trouve pas sur le site de l'ouvrage, les haubans sont livrés sur le chantier, prêts à l'emploi, sur des bobines dont les dimensions et la masse sont définies par le fournisseur du procédé, en fonction des conditions de transport et de manutention, ainsi que des caractéristiques du câble.

Lorsque les caractéristiques du hauban ne permettent pas de l'enrouler sur des bobines, des moyens de manutention adaptés sont utilisés de l'atelier de façonnage au site de l'ouvrage.



Photo 53 : livraison d'un hauban préfabriqué sur le chantier

Les rayons minimaux des bobines d'expédition, ainsi les rayons de courbures imposés lors de la manutention des haubans préfabriqués, sont adaptés de façon à :

- éviter toute déformation irréversible des armatures et du produit de remplissage ;
- préserver l'intégrité de la gaine générale éventuelle du hauban.

Pour les torons multicouches usuels, le diamètre minimal d'enroulement est de l'ordre de 30 fois le diamètre extérieur du câble.

Pour un toron gainé protégé, le diamètre minimal d'enroulement est de l'ordre de 50 fois le diamètre extérieur des torons, soit 900 mm.

Pour les haubans MFP ou MTP protégés collectivement, le diamètre minimal d'enroulement dépend du diamètre extérieur, de l'épaisseur et de la température de la gaine, ainsi que de la durée d'enroulement. En l'absence d'informations plus précises, on n'utilisera pas de diamètre d'enroulement inférieur à 50 fois le diamètre extérieur de la gaine PEHD du hauban.

ARTICLE 12.4. MISE EN PLACE DES HAUBANS

12.4.1. Mise en place des pièces d'attache

Les pièces d'attache des haubans, tubes coffrants utilisés sur les ouvrages en béton ou plaques d'appui sur charpente métallique, sont généralement mises en place et réglées par l'entreprise générale ou le charpentier.

Il convient de suivre des procédures de réglage permettant de garantir une précision en orientation compatible avec les possibilités du procédé de haubanage. Sauf indication contraire du projet, les pièces d'attache doivent être installées avec une précision en orientation de ± 5 milliradians ($\pm 0,29$ degrés).

Il y a lieu de tenir compte des déformations ultérieures de l'ouvrage pendant la construction, ainsi que des déviations angulaires par effet de chaînette (voir 5.3.7.) pour donner aux pièces d'attache une orientation compatible avec celle du hauban à la mise en service de l'ouvrage, sous charges permanentes.

Le contrôle de la position des pièces d'attache des haubans est un point d'arrêt avant le bétonnage ou le soudage. Ce point d'arrêt doit être levé par une fiche de contrôle qui sera remise à l'EDS avant le début des opérations de pose du hauban.

12.4.2. Mise en place des haubans préfabriqués

Description :

L'installation et la mise en tension des haubans préfabriqués s'adaptent aux conditions de chaque projet. Pour un pont à haubans, on procède généralement comme suit :

1. déroulement des câbles ;
2. hissage du bout de câble, avec un treuil ou une grue, et mise en place de l'ancrage haut dans le pylône, puis accrochage au moyen d'un écrou de blocage ou d'un axe ;
3. enfilage de l'ancrage bas à travers les pièces d'attache au tablier, et fixation provisoire ;
4. mise en tension du câble et fixation définitive au moyen d'un écrou de blocage ;
5. réglage, en fonction des consignes du bureau d'études.



Photos 54 et 55 : mise en place de haubans préfabriqués

Au cours de cette phase, des dispositions adaptées doivent permettre de :

- limiter les courbures subies par le hauban ;
- maintenir l'intégrité des barrières de protection anticorrosion en évitant notamment d'endommager les gaines en PEHD.

Ces dispositions consistent souvent à utiliser des palonniers de pose réglables en orientation ou des déviateurs en forme de selle arrondie.

12.4.3. Mise en place toron par toron

Description :

Les haubans MTP ancrés par clavettes sont souvent mis en place toron par toron. Cette opération comprend généralement les étapes suivantes :

- le cas échéant, mise en place entre les deux ancrages du conduit collectif préalablement assemblé. La gaine peut alors reposer sur un premier toron ou être suspendue à un câble auxiliaire par l'intermédiaire de suspentes de longueur appropriée.
- pour chaque toron, un par un :

1. mise en place du toron, par enfilage dans la gaine collective ou hissage avec un système de téléphérique. A la fin de cette phase, la partie courante du toron est approximativement à sa position définitive, mais ses extrémités ne passent pas nécessairement dans les ancrages du hauban.
 2. enfilage des extrémités du toron dans les trous appropriés des deux plaques d'ancrage et mise en place des clavettes.
 3. mise en tension du toron au vérin monotoron.
- réglage du hauban, en fonction des consignes du bureau d'études.



Photo 56 : enfilage toron par toron d'un hauban du pont sur le Tage

Pendant les opérations d'enfilage, une surveillance attentive des points singuliers du hauban (ancrages, points de guidage et selle éventuelle) est nécessaire pour éviter d'endommager la protection individuelle des torons.

Des dispositions doivent être prises pour que l'extrémité du toron en cours d'enfilage ne blesse pas la gaine collective ni les gaines individuelles des autres torons.

Des disposition adéquates doivent garantir le parallélisme des torons sur toute la longueur du hauban, et leur ancrage dans des trous correspondants des deux têtes d'ancrage.

12.4.4. Protection anticorrosion en cours de montage

Suivant les procédés de haubanage, toutes les protections anticorrosion des armatures ne sont pas mises en place dès l'installation du câble sur l'ouvrage. Si le délai précédant la protection définitive des armatures atteint plusieurs mois, l'EDS met en place une protection anticorrosion temporaire adaptée.

ARTICLE 12.5. MISE EN TENSION ET RÉGLAGE

12.5.1. Organisation du réglage et du contrôle

A l'issue des opérations de mise en place, le hauban est fixé provisoirement (cas de certains procédés de haubans préfabriqués) ou définitivement entre ses deux ancrages, avec une certaine tension.

La mise en tension et le réglage permettent d'introduire dans le hauban le préchargement prescrit par les études de conception. En fonction de la cinématique de construction de l'ouvrage, ces opérations peuvent s'effectuer en un ou plusieurs paliers successifs, en étroite collaboration avec

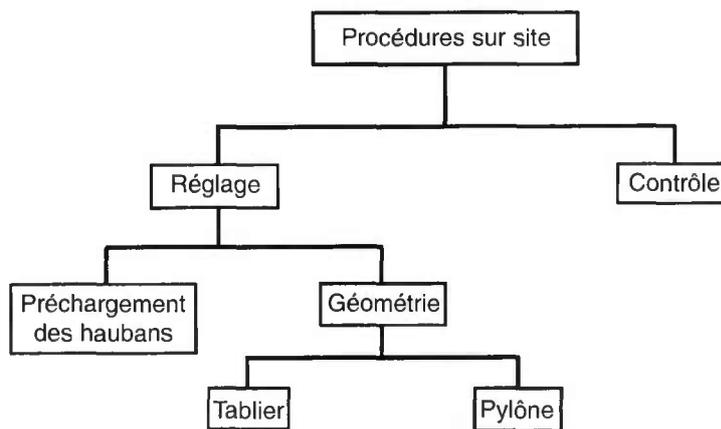
le bureau d'études d'exécution. En outre, des opérations de réglage pendant la vie de l'ouvrage peuvent s'avérer nécessaires (voir chapitre 13.)

La mise en tension et le réglage s'appuient sur des mesures de tension et d'allongements des haubans. La redondance des mesures effectuées doit permettre des contrôles.

La souplesse des ponts à haubans implique la prise en compte de l'état de la structure lors du réglage. Il convient néanmoins de bien distinguer les opérations de réglage des opérations de contrôle :

- Les procédures de réglage fournissent des instructions à la construction de l'ouvrage : elles concernent soit la géométrie (réglage de la position d'un équipage mobile avant le bétonnage d'un voussoir, réglage de l'orientation d'un tronçon métallique de tablier ou de pylône avant son raboutage par soudage, etc.) soit le préchargement des haubans.
- Les procédures de contrôle permettent de s'assurer que le comportement réel de la structure, au cours des phases de construction, est conforme aux prévisions des modèles de calcul (levés topographiques et mesures de tension des haubans à des étapes correspondant aux phases de calcul, et comparaison à leurs homologues de calcul).

Le diagramme ci-dessous résume l'organisation des procédures de réglage et contrôle. L'article 7.2. donne des recommandations sur les critères de réglage utilisables.



Organisation des procédures de réglage et de contrôle

12.5.2. Mise en œuvre du réglage d'un hauban

Sur le plan pratique, il existe deux méthodes de réglage d'un hauban, dont une est réservée aux ancrages à clavettes. On considère aussi bien le réglage initial que le réglage sur ouvrage en service.

12.5.2.1. Déplacement de l'ancrage par rapport à son appui sur la structure

Description :

Il s'agit d'un réglage d'ensemble du câble, avec plusieurs variantes technologiques :

- déplacement de la tête d'ancrage et blocage par un jeu de cales d'épaisseur ;
- déplacement de la tête d'ancrage et blocage par vissage ou dévissage d'un écrou concentrique ;
- l'ancrage est fixé à la structure par l'intermédiaire d'une ou plusieurs barres relais fileté et d'écrous autorisant un réglage.

Pour effectuer le réglage, la charge du hauban doit être temporairement relâchée de l'appui, au moyen :

- d'un vérin annulaire de grande capacité, capable de reprendre tout l'effort du hauban ;
- de dispositifs annexes ancrés sur le câble ou son ancrage (mordaches ou chevêtre) et prenant appui sur la structure.



Photo 57 : vérin annulaire



Photo 58 : installation des haubans TMC de Seyssel
- dispositifs de mise en tension

La conception de la tête d'ancrage doit autoriser une amplitude de réglage qui tient compte du cumul de tout ou partie des grandeurs suivantes, selon la technologie du hauban :

- incertitude sur la position à vide des ancrages ;
- incertitude sur l'état de sollicitation de l'ouvrage au moment des phases de mise en tension, et sur la rigidité de la structure ;
- incertitude sur la longueur à vide, la tension et la température du hauban ;
- allongement du hauban pour obtenir le préchargement requis ;
- facteurs décrits en 14.2.6.
- marge de sécurité.

L'amplitude de réglage est définie de façon irréversible après la fabrication des pièces d'ancrage (longueur de filetage périphérique de la tête, longueur des barres relais filetées, hauteur maximale de calage envisageable entre la tête et son appui sur la structure, etc.) Il faut donc l'anticiper correctement.

Il est possible de réserver une plage de détension du hauban, en ménageant une longueur filetée en arrière de l'écrou concentrique ou des écrous sur barres relais ou en introduisant quelques cales entre la tête d'ancrage et son appui sur la structure. Il faut également anticiper ce besoin.

La conception de la zone de fixation de l'ancrage sur la structure doit prendre en compte :

- des dégagements géométriques suffisants autour et derrière l'ancrage, pour la mise en place des vérins et des dispositifs nécessaires à la mise en tension ou au réglage ;
- des accès et des dispositifs de manutention adaptés aux équipements lourds.

Ces conditions géométriques sont précisées dans la notice technique du procédé de haubanage.

Ce point doit être examiné avec un soin tout particulier quand le réglage sur l'ouvrage en service n'est pas effectué avec la même méthode que la mise en tension et le réglage initial.

Si les dispositifs de réglages sont accrochés directement sur le câble au moyen de mordaches, celles-ci doivent être conçues pour ne pas endommager la protection anticorrosion du hauban.

Enfin, il convient de s'assurer que les dispositifs de réglage (écrous périphériques, barres relais, etc.) resteront en état de fonctionnement pendant la vie de l'ouvrage : filetages et taraudages protégés contre toute dégradation, couteaux d'articulation protégés contre la corrosion, etc.

12.5.2.2. Mise en tension et réglage par reprise de vérinage

Description :

L'ancrage par clavettes est réversible et permet une reprise de vérinage sur les torons, pourvu que des surlongueurs suffisantes soient conservées, et que le déplacement des torons dans la tête d'ancrage ne soit pas empêché par un remplissage rigide. Ce type d'ancrage permet alors de régler l'effort et la longueur du hauban par une retension toron par toron au vérin monotoron, ou par une retension générale du câble au vérin multitoron.

Contrairement à la méthode de réglage précédente, l'ancrage reste fixe par rapport à la structure et c'est la longueur à tension nulle du câble qui diminue.

En fin de mise en tension, la méthode de réglage par reprise de vérinage doit être réservée à une retension (élévation de tension et raccourcissement de l'armature), de façon à ne pas laisser de marques de clavettes sur la partie tendue du toron.

Les clavettes laissent sur le toron des marques de morsures qui pourraient initier des fissures de fatigue si celles-ci étaient laissées sur la longueur libre de toron. Les détensions éventuellement nécessaires peuvent être réalisées par déplacement de la tête d'ancrage, pourvu qu'un calage ou une course de filetage aie été prévu.

Les vérins utilisés doivent être capables de tendre un toron en plusieurs étapes. La conception des clavettes et du matériel de mise en tension doit éviter que de multiples réancrages n'encrassent le filetage interne des clavettes avec du métal arraché au toron.

En effet, en fonction de la course du vérin et de la longueur des haubans, il est souvent nécessaire d'effectuer de multiples reprises de tension.

Lors des opérations de mise en tension et réglage, l'ajustement et le contrôle de l'allongement et de l'effort de chaque toron est effectué en étroite collaboration avec le bureau d'études d'exécution.

Du fait du rapprochement des ancrages lors de l'installation d'un toron supplémentaire, la tension des torons précédents diminue. Des indications sur l'évolution de la tension lors d'une mise en tension toron par toron sont données à l'article 7.4.

Des dispositions doivent permettre de limiter la dispersion relative des tensions finales à moins de 2,5 % (soit $\pm 1,25$ % par rapport à la tension moyenne).

Ce résultat est généralement atteint :

- soit directement, par comparaison des tensions des différents torons au cours des opérations de mise en tension et réglage (voir article 7.4.)
- soit indirectement, par comparaison des longueurs d'allongement des différents torons à partir d'une situation d'origine convenable.

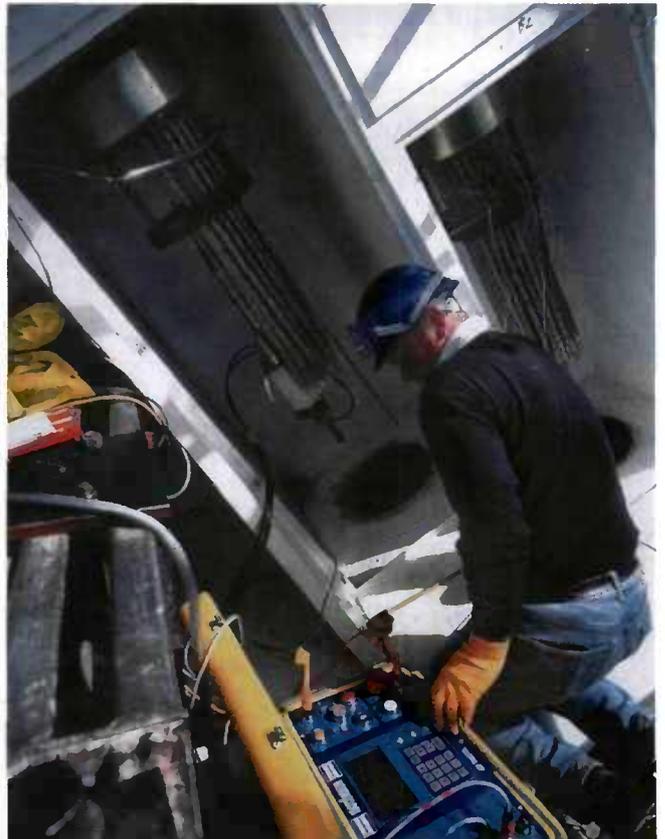


Photo 59 : mise en tension d'un hauban au vérin monotoron avec le procédé Isotension®

12.5.3. Matériel de mise en tension

Le matériel doit être conforme aux indications de la notice technique du procédé de haubanage.

L'EDS effectue le tarage des vérins au moins deux fois par an. Le chantier doit disposer de deux manomètres dont la fiche d'étalonnage date de moins de trois mois.

Les manomètres sont vérifiés préalablement à la première mise en tension, et au moins tous les 4 haubans ou 300 torons, au moyen d'un manomètre étalon. Celui-ci, d'une précision relative au moins égale à 0,5 %, est lui-même étalonné au moins une fois par an par un laboratoire compétent.

ARTICLE 12.6. PROTECTION ANTICORROSION DÉFINITIVE

La protection anticorrosion définitive comprend :

- l'injection de l'espace intermédiaire au produit souple, pour les haubans collectivement protégés (sauf en cas de circulation d'air à hygrométrie contrôlée) ;
- le traitement spécifique des zones d'ancrages (remplissage de l'enceinte locale définie en 10.2.3.)

La mise en œuvre de la protection anticorrosion est définie par l'EDS. Elle doit garantir une protection satisfaisante des armatures par deux barrières complémentaires dans les conditions de service.

12.6.1. Injection de la partie courante (haubans collectivement protégés)

Préalablement à l'injection, l'étanchéité de l'enceinte extérieure (conduit et raccords) doit être vérifiée à l'air comprimé sec et déshuilé, en bouchant tous les événements.

La température des produits souples, limitée à 120°C, doit être parfaitement homogène avant l'injection. La plage acceptable pour chaque type de produit est précisée dans la procédure d'exécution de l'injection.

La limitation à 120°C est liée à la relaxation des aciers de précontrainte. Selon la viscosité, la température d'injection d'une cire est comprise entre 80°C et 100°C ; celle d'une graisse est généralement comprise entre 50°C et 100°C.

Pour le transport du produit d'injection, on utilise généralement des camions spécialement aménagés et équipés pour maintenir la température des produits souples et les injecter. Lorsque les quantités sont plus faibles, l'approvisionnement peut être effectué en fûts et d'autres dispositifs de chauffage sont alors utilisés.

L'injection des graisses nécessite un matériel spécifique permettant de maintenir l'intégrité de leur structure. En effet, une destruction par cisaillement de la structure de la graisse accroît le risque de ressuage (voir 9.5.2.)

La pression d'injection des produits souples ne doit pas dépasser 1,5 MPa. Il convient de maintenir une pression comprise entre 0,5 MPa et 1,0 MPa pendant une durée de cinq minutes après la fin de l'injection.

Des dispositions adéquates doivent assurer le remplissage intégral du milieu intermédiaire par le produit de colmatage. En particulier, il convient de tenir compte :

- du retrait thermique initial du produit souple, entre la température d'injection T_0 et la température de service ;
- des dilatations ou contractions du produit souple lorsque la température de service varie.

Une reprise d'injection ou des vases d'expansion peuvent être nécessaires. En France métropolitaine, la température d'un hauban protégé par une gaine noire peut atteindre 60°C et plus.

12.6.2. Traitement local et cachetage des ancrages

L'exécution de la protection anticorrosion doit garantir la continuité de deux barrières complémentaires entre la partie courante et la zone d'ancrage.

Le produit de colmatage utilisé dans l'enceinte locale des ancrages doit être compatible avec la protection des armatures en partie courante.

La protection anticorrosion repose souvent sur des techniques différentes en zone d'ancrage et en partie courante, ces deux zones étant traitées dans un ordre qui dépend du procédé. L'interface entre les deux zones doit faire l'objet d'une attention particulière.

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 13. SURVEILLANCE ET MAINTENANCE DES HAUBANS

ARTICLE 13.1. PRINCIPES ET OBJECTIFS DE LA MAINTENANCE DES HAUBANS

Les exigences de durabilité des haubans sont prescrites au cas par cas, en fonction des caractéristiques de chaque projet. Cela se traduit généralement par des délais garantie contractuels et des durées d'usage prises en compte à la conception (voir chapitre 3.)

Pendant un certain délai, dénommé durée d'usage sans entretien, les différentes parties du hauban ne nécessitent pas d'entretien ; cela concerne surtout les constituants secondaires (conduits, amortisseurs, capots de protection, tubes anti-vandalisme, etc.)

En revanche, la durée de vie prise en compte à la conception n'est obtenue que moyennant maintenance des haubans. Par exemple, des organes de protection anti-corrosion ou des amortisseurs seront remplacés ou rénovés au cours de la vie du hauban, sans que cela n'entraîne de perte de performance fonctionnelle.

Aucun remplacement de l'armature des haubans n'est escompté avant ce délai. Cette durabilité fonctionnelle est donc équivalente à la durée de vie de l'ouvrage, sauf si un remplacement des haubans est prévu, par exemple à la moitié de la vie de l'ouvrage, ou rendu nécessaire par des circonstances accidentelles (choc de camion par exemple).

Pour que cette durée de vie prise en compte à la conception soit effectivement atteinte, il faut tout d'abord adopter des dispositions constructives permettant :

- les accès nécessaires à l'inspection des ancrages ;
- la maintenance ou le remplacement de chacun des constituants du hauban ;
- l'installation d'équipements de contrôle ou de vérins de retension.

En outre, il faut mettre en place un programme de surveillance et d'entretien des haubans :

- Des visites périodiques permettent de déclencher la maintenance ou le remplacement des constituants secondaires. Elles permettent également de détecter des anomalies et de provoquer la mise en place d'une surveillance spécifique.
- Les opérations exceptionnelles comprennent des investigations plus approfondies, et éventuellement déclenchent des opérations de maintenance plus lourdes.

ARTICLE 13.2. SURVEILLANCE ET MAINTENANCE

Le maître de l'ouvrage doit mettre en place un système de visites périodiques et d'inspections détaillées. Ces visites doivent être effectuées par du personnel compétent.

Leur contenu et périodicité sont formalisés dans un dossier, dénommé **Dossier de Visite et d'Entretien de l'Ouvrage** (ou du **Dossier d'Interventions Ultérieures sur l'Ouvrage** DIUO) qui prévoit :

- la fréquence des visites périodiques et des inspections détaillées ;
- les consignes d'inspection (matériel nécessaire, moyens d'accès et de sécurité, pourcentage d'éléments à vérifier, etc.) ;
- le mode opératoire de remplacement des haubans et les restrictions de circulation éventuellement nécessaires ;

- le cas échéant, les procédures de suivi en continu de l'ouvrage (monitoring), en particulier quand une retension des haubans est prévue dans la vie de l'ouvrage.

Les comptes-rendus de toutes les visites sont versés à ce dossier.

En France, les ouvrages de l'Etat reçoivent une inspection détaillée obligatoire tous les six ans. Pour les haubans, le contenu de cette inspection est défini dans le fascicule 34 de l'Instruction Technique IT79 et comporte, entre autres, la mesure des tensions et le contrôle de la géométrie.

Sauf cas particulier de suivi spécifique ou continu, outre l'inspection détaillée, on peut prévoir une visite périodique des haubans tous les trois ans.

13.2.1. Visites périodiques

En premier lieu, ces visites doivent permettre de déclencher la maintenance ou le remplacement des constituants secondaires. Un examen visuel contrôle l'influence de l'environnement sur l'ouvrage en :

- détectant les dégradations des conduits extérieurs (oxydation des tubes métalliques, fissuration des gaines PEHD individuelles ou collectives, déformations des capots, etc.) ;
- vérifiant le bon état des pièces d'ancrage et des organes des zones de transition (déviateurs, amortisseurs, tubes anti-vandalisme, joints de dilatation thermique de la gaine générale, etc.)

Cet examen visuel peut nécessiter le démontage de certains organes de protection (capots de protection des ancrages, protection anti-vandalisme, raccords de gaine, etc.) ainsi que le dégagement du produit de remplissage. Dans ce dernier cas, une nouvelle injection sera nécessaire. Ce type d'intervention doit être effectué par du personnel compétent, selon les procédures prévues par l'entreprise distributrice spécialisée.

Les visites périodiques permettent également de détecter des anomalies pouvant affecter le bon fonctionnement mécanique du hauban : toute trace de détérioration fera l'objet d'une investigation approfondie afin de déterminer l'ampleur de la détérioration, et une surveillance spécifique sera éventuellement mise en place.

Le compte-rendu de visite périodique précise notamment :

- la date de visite et le personnel qui l'a effectuée ;
- le repérage précis, au moyen d'un plan, des haubans qui ont été inspectés et des observations effectuées ;
- les opérations de démontage et de contrôle effectuées ;
- les conclusions de l'examen visuel.

13.2.2. Inspections détaillées

La fréquence des inspections détaillées est prévue dans le dossier d'ouvrage (inférieure à celle des visites périodiques). Ces inspections peuvent aussi être déclenchées par des anomalies détectées au cours d'une visite périodique, et sont alors un préalable à des opérations exceptionnelles de maintenance.

Outre l'examen visuel, les inspections détaillées peuvent comporter :

- le démontage partiel d'un hauban, avec prélèvement d'organe ou de partie d'organe pour vérifier son état de vieillissement. En particulier, le remplacement d'un toron permet de vérifier l'intégrité des armatures d'un hauban MTP (voir section 13.4.1.)
- le contrôle de la tension des câbles (méthode géométrique, au vérin ou vibratoire) ;
- le contrôle de la géométrie de l'ouvrage.

Outre l'examen visuel, les principales méthodes d'auscultation d'un câble sont :

- l'*auscultation électromagnétique*, qui permet de quantifier le degré de corrosion et de détecter les zones de ruptures de fils dans les câbles monotorons ;

- la surveillance acoustique, qui permet d'enregistrer des dates de ruptures de fils et de déclencher des alarmes éventuelles ;
- la méthode vibratoire, qui permet de mesurer la tension dans les câbles avec une assez bonne précision.
- Le principe de ces méthodes et leurs limitations d'emploi sont exposés en détail dans [4].

La mesure de la tension des haubans doit être accompagnée de relevés topographiques de la position des ancrages ainsi que de la température, pour pouvoir distinguer les dérives propres au câble et les effets du fluage ou des actions variables sur l'ouvrage.

13.2.3. Opérations de maintenance

Les opérations de maintenance les plus courantes concernent :

- la retension ou la détension d'un ou plusieurs haubans (voir article 13.3.) ;
- les reprises de la protection anticorrosion, et notamment de la peinture ou des injections de produit de colmatage ;
- le remplacement d'organes secondaires tels que tube anti-vandalisme, amortisseur anti vibration, déviateur, pièces de fixation, etc.

Des opérations plus lourdes peuvent exceptionnellement s'avérer nécessaires, généralement quand une anomalie grave est détectée :

- réparation ou changement partiel ou complet de la gaine d'un hauban ;
- changement partiel ou complet d'un hauban.

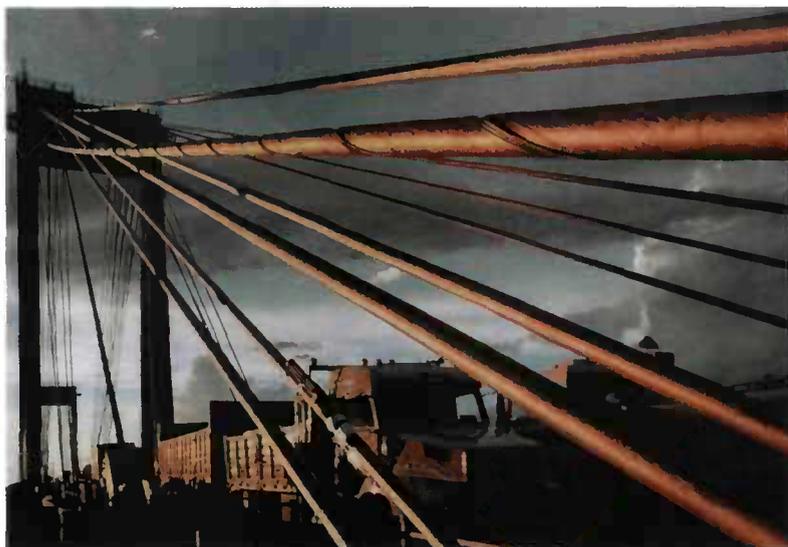


Photo 60 : état des haubans du pont du Général Belgrano en Argentine juste avant leur remplacement

ARTICLE 13.3. RÉGLAGE DES HAUBANS

13.3.1. Nécessité du réglage

La conception initiale de l'ouvrage peut prévoir une retension des haubans quelques années après la mise en service, par exemple après que le béton a effectué une partie de son fluage ou lorsque le module élastique des haubans TMC s'est stabilisé. C'est une opération que l'on désigne ici par "réglage de maintenance".

La date de retension des haubans est déterminée dès la conception, par exemple pour respecter les limites de contraintes dans le tablier en béton. Du fait de l'incertitude sur les lois de fluage du béton, cette date de conception est peu précise et un suivi spécifique peut être mis en place, pour l'affiner. C'est le cas pour le pont Vasco de Gama sur le Tage.

Le fluage des ponts à haubans en béton se traduit presque uniquement par un raccourcissement du tablier et des pylônes, d'où un affaissement des travées haubanées. Ce phénomène se produit quasiment sans variation de tension dans les haubans. La surveillance spécifique doit donc se concentrer sur les flèches du tablier.

Outre le réglage de maintenance, des facteurs imprévus tels que ceux listés en 14.2.6. peuvent rendre un réglage des haubans nécessaire.

13.3.2. Procédure de réglage

Le réglage de maintenance s'effectue généralement par un déplacement de la tête d'ancrage par rapport à son appui sur la structure, au moyen d'un ou plusieurs vérins annulaires de grande capacité, capables de reprendre tout l'effort du hauban. Voir 12.5.2.1.

La retension toron par toron des haubans MTP ancrés par coincement de clavettes n'est envisageable que si le procédé de haubanage est prévu pour réaliser ce type d'opération (voir 12.5.2.2.) et sous les conditions suivantes :

- conserver des surlongueurs de torons suffisantes ;
- disposer d'un produit d'injection souple dans la zone d'ancrage ;
- compatibilité avec les organes de déviation et les amortisseurs éventuels.

En pratique, cette méthode est rarement utilisée pour le réglage de maintenance.

Le réglage de maintenance s'effectue selon des modalités techniques proches de celles de la mise en tension et du réglage initiaux, décrites à l'article 12.5. La cinématique de retension des différents haubans, ainsi que les consignes de réglage (pression de vérin, allongement, etc.) doivent faire l'objet d'une étude précise, sur la base des prescriptions du projet initial ou du projet de réparation d'ouvrage. (Voir exemple du pont de Brotonne en 7.1.3.)

ARTICLE 13.4. REMPLACEMENT D'UN HAUBAN

La possibilité de remplacement d'un hauban repose sur les deux conditions suivantes :

1. dimensionnement de la structure avec un hauban ou une paire de haubans démontés, éventuellement avec une limitation de trafic ;
2. possibilité technologique de démonter le hauban et en installer un nouveau, comme cela est recommandé en 10.1.

Pour répondre à la première condition, les études d'exécution des ponts haubanés modernes considèrent le cas de charge spécifique du remplacement d'un hauban, selon les recommandations formulées en 14.2.7.

Si tel n'est pas le cas, on peut prévoir un remplacement toron par toron du hauban, ou un haubanage provisoire de la structure pendant le remplacement.

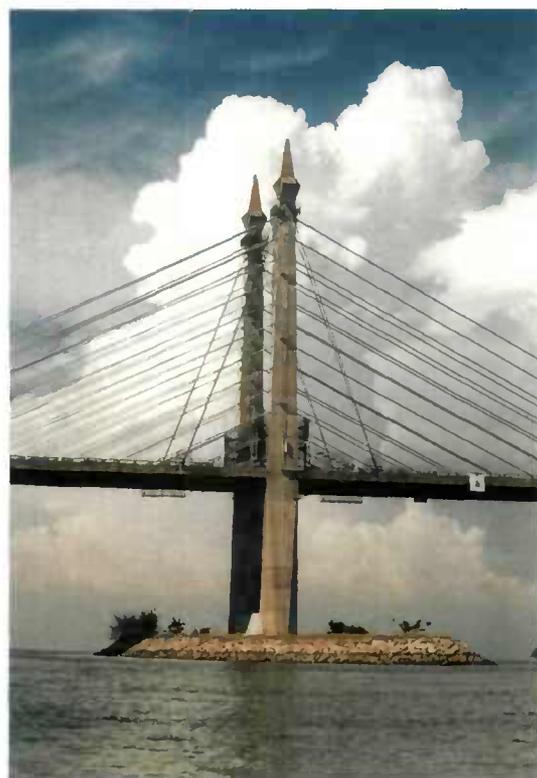


Photo 61 : remplacement de haubans sur le pont de Penang, à l'aide de haubans provisoires

13.4.1. Remplacement partiel d'un hauban

Certains procédés de haubanage MTP proposent la possibilité de remplacer un hauban toron par toron. Une conception adéquate est nécessaire. La procédure de remplacement toron par toron doit en particulier indiquer :

- les surlongueurs de torons à conserver afin de permettre une détension partielle ou la connexion d'un système de démontage ;
- le mode d'extraction du toron à remplacer et d'enfilage du nouveau toron ;
- les précautions prises pour maintenir l'intégrité de la protection anticorrosion du nouveau toron et des autres torons du hauban, tant au niveau de l'ancrage et de la zone de transition qu'en partie courante.

Ce procédé présente un certain intérêt mais ne permet pas le remplacement des blocs d'ancrages. De plus, il est très délicat de diagnostiquer l'état effectif d'un toron situé en milieu de nappe. En revanche, un tel prélèvement peut permettre une expertise détaillée du vieillissement du toron. Cette opération permet une approche statistique du vieillissement, et participe ainsi à une connaissance approfondie de l'état des haubans à un instant de la vie de l'ouvrage.

13.4.2. Remplacement complet d'un hauban

Description :

La procédure de remplacement d'un hauban complet comporte schématiquement les opérations suivantes :

1. supportage éventuel du hauban à remplacer ;
2. détension du câble ;
3. dépose et évacuation du câble détendu, de sa gaine éventuelle et de ses ancrages ;
4. installation de nouveaux ancrages et d'un nouveau câble ;
5. mise en tension et réglage ;
6. protection anticorrosion définitive.

Les opérations 4 à 6 sont identiques aux opérations 2 à 4 de l'installation initiale d'un hauban, décrite au chapitre 12. L'opération de détension doit être effectuée de façon contrôlée, selon une procédure soigneusement étudiée.

Le remplacement d'un hauban n'est généralement nécessaire que lorsque le câble est sérieusement endommagé, sa section résistante ayant beaucoup diminué (corrosion, rupture de fils, etc.), ou bien lorsque l'endommagement présente un caractère endémique, qui compromet à moyen terme la stabilité de l'ouvrage.

L'étude de la détension doit donc considérer que la résistance des armatures individuelles en place présente un caractère aléatoire, ce qui interdit de les surtendre fortement.

Deux cas de figure sont envisageables :

13.4.2.1. Détension armature par armature

Dans le cas où un réancrage de l'effort des armatures entre elles n'est pas à craindre, on peut détendre les armatures du hauban une par une :

- soit, par détension contrôlée au vérin monotoron (cas des haubans MTP lorsque des surlongueurs de torons suffisantes ont été conservées) ;
- soit, en libérant l'effort de chaque armature par une coupe au chalumeau ou à la meule.

Cette seconde technique doit être réservée au remplacement complet du hauban. Des dispositions de protection doivent cependant être prises :

- pour contrôler le fouettement des armatures, la présence d'une gaine générale pouvant s'avérer suffisante ;
- pour éviter le recul brutal des pièces d'ancrage, aux extrémités du hauban ;
- pour maintenir le hauban en position, quand on aborde la détension des dernières armatures.

13.4.2.2. Détension générale du hauban

Dans le cas de haubans injectés au coulis de ciment, à armatures sans gaines individuelles, il n'est pas possible de détendre les armatures une par une, du fait du réancrage par adhérence dans le coulis. Ces haubans doivent être détendus globalement, en relâchant l'effort de traction du câble au moyen de dispositifs annexes (mordaches) et d'un ou plusieurs vérins de grande course.

Ainsi, les haubans MFP peuvent être détendus à l'aide de barres de traction relais identiques à celles utilisées lors de la mise en tension, sous réserve que les filetages de la tête d'ancrage soient bien conservés.

De même, les haubans TMC doivent être détendus par déplacement de la douille d'ancrage en relâchant l'effort de traction du câble au moyen de dispositifs annexes et d'un ou plusieurs vérins de grande course.

QUATRIÈME PARTIE :
DIMENSIONNEMENT STRUCTUREL DES HAUBANS

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 14. RÈGLES DE CALCUL ET DE JUSTIFICATION DES HAUBANS

ARTICLE 14.1. GÉNÉRALITÉS

Comme pour les autres éléments de la structure, le dimensionnement réglementaire des haubans repose sur des justifications aux états limites avec des facteurs partiels de sécurité.

Les conditions d'emploi des haubans dépendent de leur résistance garantie à rupture F_{rg} , et d'un essai mécanique de qualification.

Il convient de prendre en compte les effets des charges statiques et des charges dynamiques sur les haubans. Par simplification, le dimensionnement des haubans rectilignes considère essentiellement les contraintes dues à la tension axiale, comme si les câbles étaient en état de traction pure.

Le chapitre 11. indique des dispositions pour limiter les efforts de flexion dans les câbles. Moyennant ces précautions, la déviation angulaire introduite dans l'essai mécanique de qualification couvre les efforts de flexion aux extrémités des haubans rectilignes dans les cas courants. Des vérifications fines de l'effet des vibrations des haubans peuvent s'avérer nécessaires dans les cas particuliers.

La situation est fondamentalement différente lorsque les haubans ne sont pas rectilignes, par exemple, en cas d'utilisation de selles de déviations des haubans dans le pylône. Les facteurs partiels de sécurité doivent alors être adaptés.

ARTICLE 14.2. ACTIONS ET COMBINAISONS D'ACTIONS

Les actions et les facteurs partiels de sécurité correspondants sont les mêmes que pour les autres éléments de la structure. Ils sont définis par les règlements de charges utilisés pour le projet. Les présentes recommandations se réfèrent aux normes Eurocodes.

Ces recommandations conviennent également à d'autres règlements de calcul, tels que le CCTG français.

Outres les actions communes à tous les types de structures, il convient de prêter attention aux actions particulières suivantes sur les haubans :

- écart de température entre la structure et les haubans ;
- remplacement d'un hauban ;
- rupture accidentelle d'un hauban.

Les combinaisons d'actions sont regroupées en états limites de services (combinaisons quasi-permanentes, fréquentes et rares des ELS) et en états limites ultimes (combinaisons fondamentales et accidentelles des ELU). On distingue les situations en service et en construction.

14.2.1. Poids propre

Les charges permanentes de poids propre, telles que le poids de la structure et le poids des équipements, sont définies par l'Eurocode 1 partie 2-1 (ENV 1991-2-1 *Densités, poids propre, charges imposées*).

Le poids propre des haubans doit être pris en compte dans la tension des câbles. Il comprend le poids de l'armature principale, ainsi que celui des éléments de protection tels que gaine, produit d'injection, etc.

14.2.2. Charges d'exploitation

Les charges d'exploitation sont définies par l'Eurocode 1 partie 3, (ENV 1991-3 *Charges sur les ponts dues au trafic*).

Pour les ponts routes, la charge dimensionnant la section des haubans est le système principal de chargement (modèle de charge 1 constitué d'une charge uniformément répartie UDL (Uniformly Distributed Load) et de charges concentrées à double essieu TS (Tandem System)). Des comparaisons montrent que ce système de chargement conduit à des charges plus excentrées que celles du règlement français Fascicule 61 titre II. C'est pourquoi le chargement européen est plus défavorable pour les ouvrages à faible inertie de torsion (bipoutre par exemple).

Les vérifications à la fatigue sont détaillées à l'article 14.6. Pour éviter les calculs d'endommagement sur les ponts routes, une vérification simplifiée peut être effectuée avec le modèle de charge de fatigue 3 de l'Eurocode 1 partie 3.

Ce modèle LM3 est un camion comportant quatre essieux, chacun ayant deux roues identiques de 2 mètres d'entre axe et dont la surface de contact est un carré de 0,40 mètre de côté. Les essieux sont distants respectivement de 1,20 mètres, 6,00 mètres et 1,20 mètres. Le poids de chaque essieu est égal à 120 kN et tient compte d'une majoration dynamique correspondant à une bonne qualité de revêtement.

Le modèle LM3 comprend un convoi unique, se déplaçant au centre d'une voie de circulation de 3 mètres de largeur dont l'emplacement correspond aux conditions de trafic normalement prévisibles. Sur les ouvrages portant deux sens de circulation, le convoi circule dans un seul sens à la fois.

Il y a lieu de calculer les contraintes maximale et minimale, et l'étendue de contrainte $\Delta\sigma$ (LM3), c'est-à-dire leur différence algébrique, résultant du déplacement du chargement sur le pont.

14.2.3. Action du vent sur les haubans

Les actions du vent sont définies par l'Eurocode 1 partie 2-4, (ENV 1991-2-4 *Actions dues au vent*). Il convient de prendre en compte les effets statiques et dynamiques du vent sur les haubans.

Les effets statiques du vent sur les haubans dépendent du coefficient de traînée C_D . Pour les haubans de section circulaire, ce coefficient varie en fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité de l'enveloppe extérieure (voir chapitre 4). Les haubans courants sont en général dans le domaine supercritique sous des vents extrêmes, mais ils peuvent se trouver dans le domaine subcritique pour des vents faibles, aux alentours de 10 m/s.

Les effets du vent extrême sont souvent calculés en donnant à C_D une valeur de 0,70 pour tenir compte de l'évolution de la rugosité avec le temps (altération de l'état de surface et dépôts sur l'enveloppe du hauban).

Une valeur de 0,80 a été prise sur certains ouvrages pour se placer du côté de la sécurité. Au contraire, pour les très grands ouvrages, lorsque la traînée des haubans est un effort prépondérant (voir fin de la section 4.3.2), on peut prendre une valeur légèrement inférieure à 0,70 pour tenir compte du fait que la traînée n'est pas extrême simultanément sur tous les haubans.

14.2.4. Actions thermiques

Les actions thermiques sont définies par l'Eurocode 1 partie 2-5, (ENV 1991-2-5 *Actions thermiques*). Elles comportent des variations uniformes de température de la structure et des gradients thermiques dans le tablier.

L'inertie thermique des câbles étant beaucoup plus faible que celle du reste de la structure (pylône et tablier notamment), la température des haubans peut différer de celle de la structure. C'est pourquoi il convient de considérer un écart de température $\Delta\theta_h$ entre l'ensemble des haubans et le reste de la structure. La valeur caractéristique de cet écart dépend de la couleur de la gaine extérieure des haubans.

A titre d'exemple, le tableau ci-dessous indique des actions thermiques cohérentes avec les mesures effectuées sur le pont de Normandie (valeurs caractéristiques).

Cas de charge (en °C)		TR1	TR2	TR3	TR4
Variation uniforme de température	Béton	+30	-40		
	Métal	+40	-40		
	Haubans	+30 + $\Delta\theta_h$	-40		
Gradient thermique	Tablier			+12	0
	Ecart haubans / structure			+2. $\Delta\theta_h$	- $\Delta\theta_h$

Des valeurs caractéristiques $\Delta\theta_h$ de 5°C et 12°C ont été employées respectivement pour des haubans de couleur claire et de couleur noire.

14.2.5. Préchargement de la structure

L'action des haubans est calculée en valeur nominale, à partir de leur prédéformation ε à la mise en service de l'ouvrage (voir chapitre 7.)

L'utilisation de la valeur probable, plutôt que de la valeur caractéristique, évite des calculs fastidieux. En outre, les majorations de charges permanentes couvrent largement les imprécisions de mise en tension des haubans : une augmentation sensible des charges permanentes ne pourrait pas passer inaperçue, et serait immédiatement détectée par des flèches importantes du tablier.

Le respect des recommandations du chapitre 13. sur les dispositions de réglage et de contrôle en cours d'installation des haubans et la tolérance de 2,5 % sur la dispersion des tensions des armatures au sein d'un même hauban, justifie l'emploi de la prédéformation nominale ε comme une valeur probable.

Les autres types de préchargement, tels que la précontrainte (pour les structures en béton précontraint) et les dénivellations d'appui, sont pris en compte conformément aux Eurocodes structuraux correspondants.

14.2.6. Réglage des haubans

La conception de chaque hauban doit permettre un réglage, depuis l'un des deux ancrages au moins, avec une plage d'ajustement couvrant les effets structurels suivants :

- augmentation du poids propre du tablier de 5 % ;
- augmentation du poids des équipements (superstructures) de 20 % ;
- déformation de la structure, sous l'effet du retrait et du fluage du béton, ou des imprécisions de construction, correspondant à une flèche du tablier à mi portée de $L/2000$ où L est la longueur de la travée principale de l'ouvrage.

En plus de la plage de réglage prévue sur l'ancrage, il convient de prendre les dispositions constructives décrites en 12.5.2.1.

14.2.7. Remplacement des haubans

La structure et les haubans doivent être dimensionnés pour permettre le remplacement d'un hauban quelconque dans des conditions de service définies par le maître de l'ouvrage.

Pour des raisons pratiques et de sécurité des ouvriers, les restrictions de circulation ci-dessous sont généralement nécessaires en cours de remplacement :

- *sur les ponts haubanés avec deux nappes latérales de haubans, les voies de circulation le long des haubans en cours de remplacement sont fermées, sauf si l'on dispose de bandes d'arrêt d'urgence de largeur suffisante (3 mètres) ;*
- *sur les ponts haubanés ne comportant qu'une nappe centrale de haubans, les voies rapides sont fermées des deux côtés de la nappe en cours de remplacement.*

La structure privée du hauban en cours de remplacement, ou de la paire de haubans si le remplacement se fait par paires, doit être capable de supporter toutes les charges d'exploitation s'appliquant aux voies qui ne sont pas fermées à la circulation, cumulées aux charges de chantier sur la zone fermée à la circulation. Les justifications concernant le remplacement des haubans sont effectuées avec les mêmes facteurs partiels de sécurité que pendant la construction de l'ouvrage.

En plus d'une conception structurelle ad hoc, le remplacement des haubans nécessite des ancrages permettant en toute sécurité une détension complète du câble, si nécessaire à l'aide de barres de traction ou de câbles auxiliaires (voir chapitres 10. et 13.)

14.2.8. Rupture accidentelle d'un hauban

Il convient de prendre en compte l'action accidentelle de la rupture d'un hauban quelconque, à raison d'un seul hauban à la fois. Cette rupture est représentée par une force opposée à la tension du hauban, exercée à ses deux ancrages, et pondérée d'un facteur d'amplification dynamique à justifier, compris entre 1,5 et 2,0.

Le coefficient d'amplification dynamique dépend de la nature de la rupture (choc de véhicule, corrosion des armatures, etc.) ainsi que de la réponse dynamique de la structure. Un coefficient dynamique de 2,0 est une valeur enveloppante particulièrement sévère, correspondant au cas improbable de la rupture brutale de l'intégralité du câble. Une analyse détaillée des effets dynamiques de la rupture d'un hauban de pont est effectuée dans [17].

Pour des haubans à armatures parallèles indépendantes (MTP, MFP), la rupture simultanée de toutes les armatures étant peu vraisemblable, le facteur d'amplification peut être ramené à 1,5.

Les justifications locales et globales concernant la rupture du hauban sont effectuées aux ELU, en combinant à l'effet de la rupture, les charges d'exploitation prises avec leur valeur d'accompagnement.

La charge d'accompagnement fixée par l'Eurocode 1 est $0,75 TS + 0,40 UDL$.

14.2.9. Effet de chaînette

L'analyse de la structure doit être menée avec la rigidité axiale effective des haubans, tenant compte l'effet de toronnage éventuel (voir article 9.4.) et de la réduction par effet de suspension caténaire (module tangent au point de fonctionnement de l'ouvrage sous charges permanentes rappelé à l'article 5.6.)

Sous réserve que le module tangent du hauban sous son chargement axial minimum à l'état limite de service soit d'au moins 95 % du module du câble rectiligne, il est admissible par simplification de ne pas tenir compte de l'effet de chaînette.

ARTICLE 14.3. RÉSISTANCE DES HAUBANS

14.3.1. Résistance caractéristique du câble

La force de rupture garantie d'un câble est notée F_{GUTS} (pour guaranteed ultimate tensile strength). Elle est définie pour chaque procédé de haubanage à partir de la classe normalisée f_{rg} des fils ou torons élémentaires constituant le hauban, lorsqu'ils sont parallèles, ou à partir d'essais de traction.

La connaissance de cette force de rupture garantie permet en retour de calculer une contrainte ultime de traction garantie des armatures au sein du hauban, notée f_{GUTS} en divisant F_{GUTS} par la section nominale du câble.

14.3.1.1. Haubans MTP et MFP

Pour les haubans à torons ou fils parallèles, la force de rupture garantie du câble F_{GUTS} est égale à la somme des forces des fils ou torons élémentaires, elles-mêmes égales au produit de la classe f_{rg} par la section de l'armature (par définition de la classe de résistance).

Pour un câble constitué de N composants élémentaires de section nominale A_{nom} , on a donc :

$$F_{GUTS} = f_{rg} \times A_{nom} \times N$$

Dans ce cas, la contrainte ultime de traction garantie des armatures au sein du hauban est évidemment égale à la classe de ces armatures :

$$f_{GUTS} = F_{GUTS} / (A_{nom} \times N) = f_{rg}$$

14.3.1.2. Haubans TMC

Pour les haubans à toron multi-couches, le toronnage des fils élémentaires génère une "perte au commettage" si bien que la force de rupture garantie F_{GUTS} du câble ne peut pas être calculée directement à partir de la classe de résistance des fils, et doit être déterminée par un essai de traction à rupture ou sur la base de l'expérience préalable.

On peut alors définir conventionnellement une contrainte ultime de traction garantie des fils au sein du hauban f_{GUTS} en divisant F_{GUTS} par la section droite résistante du câble (elle-même déterminée comme la somme des sections droites des fils élémentaires) :

$$f_{GUTS} = F_{GUTS} / A_{nom}$$

Le rapport entre f_{rg} et f_{GUTS} est le coefficient de perte au commettage :

$$k_c = f_{GUTS} / f_{rg}$$

La perte au commettage dépend de l'angle de toronnage et de la constitution du toron multi-couches (diamètres et classes des fils constitutifs). Il est difficile de la prévoir par le calcul, mais on constate qu'elle est généralement comprise entre 4 et 10 %.

Dans les cas courants, k_c vaut 0,93 et l'on peut estimer la force de rupture garantie d'un câble constitué de fils de classe identique f_{rg} avec la formule suivante :

$$F_{GUTS} = 0,93 \times f_{rg} \times A_{nom}$$

14.3.1.3. Valeurs effectives et valeurs garanties

Le mode opératoire de l'épreuve mécanique de qualification (voir chapitre 11.) définit une autre contrainte ultime de traction : la contrainte ultime de traction effective des armatures élémentaires (ou du câble monoton), mesurée au cours d'un essai de traction à rupture sur une armature élémentaire (fil ou toron) et notée $f_{réel}$ ou f_{AUTS} (pour actual ultimate tensile strength).

Pour les haubans MTP ou MFP, f_{AUTS} peut être légèrement supérieure à f_{GUTS} . Pour les haubans TMC, f_{GUTS} est calculée conventionnellement à partir d'un essai et a la même définition que f_{AUTS} .

Les contraintes de dimensionnement des haubans utilisées dans les règles ci-dessous sont toujours des valeurs garanties, c'est-à-dire f_{GUTS} . La valeur effective f_{AUTS} n'est pas utilisée, excepté dans le cas particulier des torons multi-couches où les valeurs garanties ne sont pas directement significatives.

14.3.2. Sécurité à introduire sur la résistance du câble

La force de rupture garantie d'un hauban, F_{GUTS} , doit être pondérée par deux facteurs partiels (voir [27]) :

- un premier facteur γ_{m1} couvrant l'écart entre les conditions de l'essai de qualification et les conditions réelles du hauban dans la structure ;
- un second facteur γ_{m2} couvrant les incertitudes d'exécution et le vieillissement des haubans.

14.3.2.1. Facteur partiel γ_{m1}

Le facteur partiel γ_{m1} est spécifique aux conditions de l'épreuve mécanique de qualification. C'est pourquoi sa valeur est adaptée au mode opératoire retenu, selon les indications du tableau ci-dessous :

Facteur partiel γ_{m1}	Epreuve mécanique en tout point conforme au mode opératoire défini au chapitre 11	Essai de fatigue effectué sans déviation angulaire. Essai de traction à la rupture conforme au chapitre 11.	Autres cas
Situations d'exécution	1,10	1,15	1,23
Ouvrage en exploitation	1,15	1,20	1,30

L'épreuve mécanique recommandée au chapitre 11. est une épreuve de qualification. Elle reproduit au mieux les conditions réelles : géométrie, éléments d'ancrage et de déviation, armatures, protection anticorrosion, méthode de mise en tension.

Toutefois, les conditions d'un essai en laboratoire préparé avec soin sont plus favorables que les conditions sur l'ouvrage réel. C'est pourquoi des sollicitations axiales et des déviations angulaires très défavorables sont introduites lors de cet essai. De plus, la faible longueur de l'échantillon testé ne permet pas de redistribution importante entre les constituants élémentaires du câble.

En outre, il s'agit d'un essai coûteux qui peut difficilement être reproduit un nombre de fois suffisant pour permettre une analyse statistique rigoureuse. Cet essai ne fournit donc qu'une valeur probable de la résistance résiduelle du câble tenant compte :

- de la réduction locale de la capacité en traction du câble, due aux conditions d'ancrage ;
- des déviations angulaires permanentes des torons ou des fils, dans la zone d'ancrage ;
- des dommages en fatigue dus aux surtensions axiales ;

- des dommages en fatigue dus aux déviations angulaires, si celles-ci sont introduites dans l'essai.

Enfin, l'emploi du facteur partiel γ_{m1} pour les vérifications en cours d'exécution ne doit pas prendre en compte l'endommagement par fatigue, que l'on peut estimer à 5 %, à partir du critère de résistance ultime après fatigue dans l'épreuve mécanique définie au chapitre 11. Cela explique l'écart entre les deux lignes du tableau ci-dessus.

14.3.2.2. Facteur partiel γ_{m2}

Le facteur partiel γ_{m2} couvre notamment les imperfections d'exécution :

- les imperfections de fabrication des pièces d'ancrage et des armatures en usine ;
- les imperfections de mise en place des ancrages et des câbles sur l'ouvrage réel ;
- la possibilité d'une amorce de corrosion sur les armatures lors des périodes de stockage sur chantier ;
- le vieillissement des haubans pendant la vie de l'ouvrage, et notamment les effets de la flexion aux extrémités des haubans.

La valeur de γ_{m2} est adaptée à la durée d'application des charges et aux dispositions constructives prises au niveau des ancrages pour éviter l'endommagement par flexion des câbles, selon les indications du tableau ci-dessous :

Le facteur partiel γ_{m2} a été calibré par rapport aux câbles de précontrainte, également sujets aux imperfections de fabrication, et pour lesquels des analyses statistiques conduisent à une valeur γ_{m2} de 1,15. En outre, le facteur partiel γ_{m2} couvre les contraintes de flexion du câble près des ancrages, résultant des vibrations éventuelles du câble ou des rotations du tablier au droit des ancrages.

	Situations d'exécution (durée de l'ordre d'une semaine au plus), ou situation accidentelle de rupture d'un hauban	Ouvrage en exploitation, lorsque des dispositions suffisantes sont prises pour limiter les efforts de flexion aux extrémités des haubans	Ouvrage en exploitation, lorsque des efforts de flexion significatifs peuvent atteindre les extrémités des haubans
Facteur partiel γ_{m2}	1,20	1,25	$\geq 1,30$ *

* Adapté aux contraintes de flexion résiduelles rencontrées aux ancrages

Les dispositions constructives pour limiter les efforts de flexion comprennent notamment :

- La mise en œuvre de dispositifs de guidage du câble, filtrant ou limitant les déflexions angulaires au droit de l'ancrage. Il convient alors d'évaluer les efforts de flexion résiduels qui atteignent les ancrages malgré ces dispositifs de guidage (voir chapitre 6.) Si les contraintes de flexion résiduelles sont inférieures à 50 MPa, elle peuvent être négligées.
- L'amortissement des vibrations du câble par les moyens recommandés au chapitre 4. (amortisseurs, aiguilles d'interconnexion, gaine profilée).
- L'articulation des ancrages par rapport à la structure pendant les phases de construction (rotule), ou la mise en œuvre d'une procédure efficace de réglage de l'axe des ancrages pour éviter les déviations angulaires permanentes imprévues entre le hauban et le tablier ou le pylône.

ARTICLE 14.4. ETATS LIMITES ULTIMES

14.4.1. Câble

La tension d'un hauban sous l'effet des combinaisons ELU, en situation d'exécution ou sur l'ouvrage en exploitation, doit vérifier la relation :

$$F_{ELU} \leq \frac{F_{GUTS}}{\gamma_{m1} \gamma_{m2}}$$

Lorsque des dispositions suffisantes sont prises pour limiter les efforts de flexion aux extrémités des haubans, et que l'essai mécanique de qualification a été effectué selon le mode opératoire recommandé au chapitre 11. on doit alors vérifier $F_{ELU} \leq 0,70 F_{GUTS}$ pour les situations en service. Pour les situations de construction et les situations accidentelles, on doit vérifier $F_{ELU} \leq 0,75 F_{GUTS}$.

14.4.2. Pièces d'ancrages

Tous les organes d'ancrage (plaque d'ancrage, douille, mors, manchons fileés, etc.) ainsi que les éléments de réglage servant de relais entre l'ancrage du câble proprement dit et la structure (barres, étriers, chevêtres, chapes, etc.) sont conçus de façon à présenter une résistance supérieure à la résistance ultime F_{GUTS} du câble qu'ils sont destinés à ancrer.

Le dimensionnement des ancrages est vérifié par l'essai de traction statique à la rupture défini au chapitre 11. La force de rupture du câble peut entraîner une plastification irréversible des pièces d'ancrage, mais celles-ci ne doivent pas présenter de rupture ou fissure détectable, comme prescrit en 11.2.2.3.

En outre, aucune déformation plastique irréversible des pièces susceptibles de gêner le démontage n'est autorisée sous les charges extrêmes correspondant aux ELU.

La résistance d'un procédé de haubanage ne doit pas être limitée par celle de ses ancrages, même si ceux-ci sont facilement remplaçables. Ce principe de sécurité est fondé sur les deux raisons suivantes :

- *la part du coût des ancrages dans le coût total d'un hauban est limitée pour les câbles de grande longueur ;*
- *il est plus aisé de contrôler la capacité du câble que celle de l'ancrage.*

La déformation des pièces d'ancrage sous la charge correspondant aux ELU peut être déterminée lors de l'essai de traction à l'aide de jauges ou comparateurs.

Les barres servant parfois de relais entre l'ancrage du câble proprement dit et la structure sont sollicitées en traction axiale et ne présentent pas la même ductilité qu'un câble. Elles doivent présenter une résistance élastique conventionnelle à 0.1 % supérieure ou égale à la résistance ultime F_{GUTS} du câble.

14.4.3. Eléments de liaison

Par éléments de liaison, on entend les parties de la structure (pièces de pont, bracons, bossages, etc.) sur lesquelles s'appuient les ancrages des haubans et transférant la tension du câble à la structure.

Les éléments de liaison sont passibles du dimensionnement aux états limites, selon les Eurocodes structuraux correspondants, et doivent être capables de reprendre l'effort $0,9 F_{GUTS}$ considéré comme une action unitaire à l'ELU.

Contrairement au câble, les éléments de liaison font partie de la structure et sont généralement non remplaçables. Il convient de s'assurer qu'un écoulement plastique du câble, se produisant à un effort $0,9 F_{GUTS}$, précède la plastification de ces éléments.

Par exemple, les contraintes dans les pièces de liaison en acier sont limitées à la limite élastique f_y ou f_e sous l'action de $0,9 F_{GUTS}$.

Outre l'effort longitudinal de traction, les éléments de liaison doivent être conçus et dimensionnés pour reprendre les efforts transversaux éventuels exercés par le hauban dans la zone d'ancrage.

Par exemple les guides de filtration de déviation ou les amortisseurs internes peuvent exercer sur les éléments de liaisons des efforts statiques ou en fatigue de l'ordre de 1 à 2 % de l'effort longitudinal permanent du hauban.

ARTICLE 14.5. ETATS LIMITES DE SERVICE

Pour des raisons pratiques de simplification des calculs, les justifications aux ELS sont définies de façon à couvrir les ELU dans les cas généraux. Les contraintes limites aux ELS sont compatibles avec les sollicitations en fatigue des haubans et limitent les phénomènes de relaxation des câbles.

14.5.1. Justifications pour l'ouvrage en exploitation

Lorsque des dispositions constructives exposées au paragraphe 14.3.2.2. sont prises pour limiter les efforts de flexion aux extrémités des haubans et la fatigue des câbles, la tension d'un hauban sous l'effet des combinaisons ELS rares doit vérifier la relation :

$$F_{ELS} \leq 0,50 F_{GUTS}$$

Dans le cas contraire, la tension d'un hauban sous l'effet des combinaisons ELS rares doit vérifier la relation :

$$F_{ELS} \leq 0,45 F_{GUTS}$$

La résistance axiale des haubans dépend des sollicitations en flexion et en fatigue des câbles. La pratique usuelle dans la conception des ponts haubanés était de garder une marge de sécurité importante pour couvrir ces effets parasites, en limitant la tension des haubans à $0,45 F_{GUTS}$. Cette marge de sécurité semble excessive si l'on adopte des dispositions constructives pour limiter les efforts de flexion et les effets de fatigue sur les câbles.

En outre, comme indiqué à l'article 14.2.2., des calculs comparatifs montrent que les charges réglementaires de l'Eurocode 1 partie 3 sont parfois plus pénalisantes que les charges françaises du Fascicule 61 titre II, notamment dans le cas des ouvrages peu rigides en torsion. La limitation à $0,50 F_{GUTS}$ conduit alors à des sections de câble identiques avec les charges de l'Eurocode que la limitation classique à $0,45 F_{GUTS}$ avec les charges françaises.

14.5.2. Justifications en situation d'exécution

14.5.2.1. Cas général

Lors des phases de construction, les haubans peuvent être soumis à des charges de chantier (équippage mobile en encorbellement par exemple) conduisant à des efforts supérieurs à ceux de l'ouvrage en exploitation. Si la durée de ces situations d'exécution est suffisamment courte, de l'ordre d'une semaine, les effets en fatigue des vibrations des haubans sont en général négligeables. Cela justifie d'augmenter le taux de travail admissible dans les haubans en phase de construction.

Lorsque des dispositions suffisantes sont prises pour limiter les efforts de flexion aux extrémités des haubans et la fatigue des câbles, la tension d'un hauban sous l'effet des combinaisons ELS en construction doit vérifier la relation :

$$F_{ELS} \leq 0,55 F_{GUTS}$$

Dans le cas contraire, la tension d'un hauban sous l'effet des combinaisons ELS en construction doit vérifier la relation :

$$F_{ELS} \leq 0,50 F_{GUTS}$$

Les limites majorées indiquées dans cet article ne s'appliquent qu'aux haubans définitifs, utilisant un procédé conçu pour une endurance en fatigue à l'échelle de la durée de vie de l'ouvrage. L'endommagement en fatigue subi pendant les phases d'exécution, sur une à deux semaines est alors négligeable.

Au contraire, les effets des vibrations des haubans pendant les phases de construction peuvent être déterminants dans les deux cas suivants :

- Certains haubans provisoires sont utilisés pendant plusieurs mois, comme par exemple ceux qui soutiennent un pont en arc construit par encorbellements successifs. Les ancrages de ces haubans provisoires sont généralement plus économiques que des ancrages de haubans définitifs et ne comportent pas de possibilité de réglage en orientation ni de dispositif de filtration des flexions. Dans ce cas, l'endommagement par fatigue ou usure des câbles provisoires peut être rapide, allant jusqu'à des ruptures de fils ou torons pendant la construction.
- Les haubans définitifs sensibles à l'excitation par le vent, ne sont pas toujours équipés de leur amortisseur pendant les phases de construction. Si l'on prévoit d'équiper les haubans d'amortisseurs, ou si l'on en constate a posteriori le besoin, il convient de réduire au minimum le délai de pose de ces amortisseurs.

Dans ces cas particuliers, des analyses spécifiques sont nécessaires, et la contrainte des haubans ne doit pas dépasser les valeurs autorisées sur un ouvrage en exploitation, voire des valeurs encore plus contraignantes.

14.5.2.2. Cas de haubans installés et tendus toron par toron

Dans ce cas, la contrainte de traction dans les premiers torons mis en place pourra atteindre $0,60 f_{GUTS}$, sous réserve que cette contrainte devienne inférieure à $0,55 f_{GUTS}$ après la mise en tension des torons suivants, dans un intervalle de temps n'excédant pas quelques heures pour éviter tout phénomène de relaxation.

Pendant la mise en tension d'un câble, l'effort introduit au vérin limite lui-même les contraintes dans les constituants du câble. De plus, lorsque le hauban est installé et tendu toron par toron, la tension dans les premiers torons mis en place diminue rapidement lors de l'installation des torons suivants, comme on l'a vu à l'article 7.4. Cela justifie une réduction des facteurs de sécurité habituels.

ARTICLE 14.6. VÉRIFICATIONS À LA FATIGUE

14.6.1. Principes de base

L'endommagement en fatigue des haubans se produit habituellement au niveau des ancrages, sous l'effet cumulé des charges axiales variables et des sollicitations répétées en flexion provoquées par des déviations angulaires aux extrémités. Ces déviations angulaires sont principalement dues aux vibrations des haubans sous l'effet dynamique du vent turbulent, et aux rotations du tablier de pont au niveau des ancrages bas.

Une vérification à la fatigue des haubans rigoureuse doit donc reposer sur des calculs d'endommagement des haubans basés sur le critère de Palmgren-Miner :

- les spectres de contrainte axiale de fatigue et de rotation des ancrages peuvent être obtenus à partir des historiques de contrainte sous des charges de fatigue données par des enregistrements de trafic ou les modèles de chargement de fatigue de l'Eurocode 1 partie 3 ;
- les spectres de déviations angulaires des haubans peuvent être déduits de calculs de réponse dynamique des haubans au vent turbulent, comme exposé au chapitre 4 ;
- cette approche nécessite enfin la connaissance des courbes de fatigue des haubans sous sollicitations axiales ou angulaires.

Toutefois, l'importance de l'effet des déviations angulaires sur la résistance en fatigue des haubans, et la difficulté à prévoir et quantifier les phénomènes en jeu, ont conduit les concepteurs d'ouvrages haubanés et les entreprises distributrices de procédés à adopter des dispositions constructives permettant d'éliminer l'essentiel des effets de flexion locale :

- dispositifs de guidage du câble à proximité des ancrages ;
- amortissement des vibrations de hauban ;
- limitation des déviations angulaires permanentes à l'ancrage.

Lorsque les dispositions constructives décrites à l'article 14.3.2.2. sont adoptées, la résistance de l'ouvrage à la fatigue est assurée par les deux conditions suivantes :

1. le procédé de haubanage est qualifié par l'épreuve mécanique définie au chapitre 11.
2. les haubans sont conçus pour ne pas présenter une sensibilité excessive à la fatigue.

Cette seconde condition se traduit par une vérification portant uniquement sur les contraintes axiales dans les haubans, pour justifier que l'étendue de contrainte sous la charge axiale de fatigue est inférieure à la limite de troncature du procédé de haubanage.

Comme indiqué à l'article 14.1. cette vérification simplifiée – voire simpliste – n'est suffisante que pour les haubans rectilignes. Dans les cas particuliers, par exemple des câbles passant dans une selle de déviation au niveau du pylône ou lorsque les contraintes du projet ne permettent pas de mettre en œuvre de dispositions limitant la flexion locale des câbles, une analyse spécifique doit vérifier la résistance en fatigue des haubans.

14.6.2. Courbe de fatigue S-N d'un hauban

La forme de la courbe de fatigue S-N (ou courbe de Wœhler) d'un hauban dépend du procédé de haubanage, mais elle présente généralement l'allure bilinéaire ci-dessous. Elle s'incurve aux alentours de 2 millions de cycles, pour une étendue de contrainte $\Delta\sigma_0$.

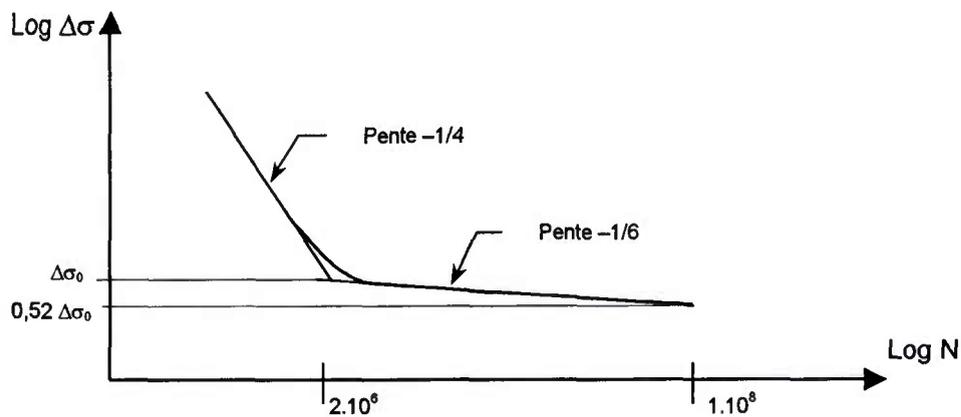


Figure 47 : courbe de fatigue typique d'un hauban

En l'absence de données complémentaires, il est admis d'identifier la résistance en fatigue à 2 millions de cycles $\Delta\sigma_0$ d'un hauban à l'étendue de contrainte $\Delta\sigma_{\text{TEST}}$ appliquée pendant l'épreuve de qualification mécanique.

L'épreuve mécanique recommandée au chapitre 11. vise à qualifier la résistance en fatigue du procédé de haubanage contre des sollicitations axiales et angulaires. Il s'agit d'un essai trop coûteux pour permettre de le répéter un nombre de fois suffisant pour une analyse statistique rigoureuse. En particulier, il ne permet pas d'établir rigoureusement la courbe S-N du hauban, mais donne donc une assez bonne idée de la résistance en fatigue à deux millions de cycles $\Delta\sigma_0$. Le chapitre 11. recommande une étendue $\Delta\sigma_{\text{TEST}}$ de 200 MPa.

En première approximation, la pente de la seconde partie de courbe peut être estimée à $-1/6$. La limite d'endurance du hauban à 100 millions de cycles est donc égale à :

$$\Delta\sigma_0 \left(\frac{10^8}{2 \cdot 10^6} \right)^{-1/6} = 0,52 \cdot \Delta\sigma_0$$

Lorsque le procédé de haubanage prévient les problèmes d'usures UIP et FIP, la pente de la seconde partie de la courbe S-N est en fait plus faible (en valeur absolue), et peut être déterminée par une série d'essais de fatigue poussés au delà de deux millions de cycles.

14.6.3. Vérification simplifiée en fatigue

La résistance en fatigue d'un hauban doit être pondérée d'un facteur partiel de sécurité γ_{Mf} . Lorsque la résistance en fatigue à 2 millions de cycles est déterminée à partir de $\Delta\sigma_{TEST}$ selon le mode opératoire recommandé au chapitre 11, le facteur partiel γ_{Mf} vaut **1,5**.

Le facteur partiel γ_{Mf} tient compte notamment :

- de la dispersion importante sur les résultats des essais de fatigue et de l'absence de traitement statistique sur l'épreuve de qualification ;
- du caractère partiel des vérifications en fatigue qui considèrent l'endommagement dû aux déviations angulaires de manière forfaitaire.

De même que pour les vérifications à la fatigue des structures métallique (voir Eurocode 3), ce coefficient permet d'obtenir une fiabilité suffisante en fatigue des haubans.

Les haubans d'un pont-route doivent être conçus de façon à résister à 100 millions de passages de la charge de fatigue LM3. On vérifiera donc :

$$\Delta\sigma(LM3) \leq \frac{0,52 \Delta\sigma_{TEST}}{\gamma_{Mf}}$$

En pratique, la justification à la fatigue d'un hauban de pont-route consiste à limiter l'étendue de contrainte de traction provoquée par le convoi LM3 à 70 MPa.

Selon les ouvrages considérés, d'autres charges de fatigue peuvent se révéler plus appropriées : convois de deux camions de charge 30 t se suivant sur un pont-route, convois de fatigue ferroviaires sur un pont-rail, etc. Ces chargements sont spécifiés au cas par cas par le maître de l'ouvrage.

ARTICLE 14.7. SELLES DE DÉVIATION

Les selles doivent être conçues de telle façon que :

- la résistance à la rupture en traction du câble passant dessus ne soit pas réduite de plus de 5 %, sauf si des calculs détaillés démontrent qu'une réduction plus importante est admissible ;
- la résistance à la fatigue du câble soit appropriée, en tenant compte de l'action cyclique d'enroulement et de déroulement provoquée par les variations de la charge appliquée ;
- le câble puisse être remplacé.

De manière générale, le rayon de courbure de la selle ne doit pas être inférieur à $125 \varnothing$, \varnothing étant le diamètre extérieur des fils ou torons utilisés. Un rayon inférieur doit être justifié par des calculs détaillés ou un essai de qualification démontrant que les conséquences sur la résistance à la traction et à la fatigue sont acceptables.

Ces calculs détaillés doivent notamment prendre en compte le cumul des contraintes de traction et de flexion du câble dévié par la selle, ainsi que les problèmes de fatigue et d'usure, conformément aux recommandations du chapitre 6.

Tout glissement du câble sur la selle doit être empêché, par la force de frottement ou l'utilisation de moyens de serrage appropriés. Les facteurs partiels de sécurité γ_M pour les coefficients de frottement entre câble et surface d'appui de la selle prennent les valeurs suivantes :

- Lorsqu'une augmentation du frottement entraînerait une augmentation du niveau de sécurité pour le pont : $\gamma_M = 2,0$.
- Lorsqu'une réduction du frottement entraînerait une augmentation du niveau de sécurité pour le pont : $\gamma_M = 0,9$.

Le premier facteur partiel peut être réduit à 1,5 si des essais permettent de caractériser précisément le frottement sur la selle.

ARTICLE 14.8. CÂBLES DE PRÉCONTRAINTÉ EXTRADOSSÉE

Les câbles de précontrainte extradossée ont un comportement intermédiaire entre celui des câbles de précontrainte extérieure, dont le tracé s'inscrit dans la hauteur des poutres intéressées, et celui des haubans qui assurent une suspension quasi totale du tablier :

1. Ils ont une flèche sensiblement plus importante que celle des câbles de précontrainte extérieure. Ils peuvent subir des surtensions importantes sous l'effet des charges d'exploitation, en fonction des portées, des conditions de liaison pile/tablier, etc.
2. L'action du vent ne provoque pas de vibrations ou de déviations angulaires significatives.

Type de câble	Surtension due aux charges d'exploitation fréquentes	Vibrations dues aux vent
Haubans	De l'ordre de 100 MPa (entre 60 et 160 MPa)	Oui
Précontrainte extradossée	De l'ordre de 50 MPa (entre 30 et 100 MPa)	Négligeables
Précontrainte extérieure	De l'ordre de 15 MPa	Non

Si les deux conditions ci-dessus sont remplies, il convient d'adopter les critères de dimensionnement donnés aux paragraphes suivants pour les câbles extradossés. La catégorie d'utilisation A de l'essai de qualification a été définie en vue de servir cet usage, avec des conditions d'essai proches des conditions d'utilisation en précontrainte extradossée (voir chapitre 11.)

En cas contraire, et notamment si l'action du vent devient sensible, il convient de se rapprocher d'une conception similaire aux haubans :

- dispositifs limitant les vibrations des câbles ;
- ancrages résistant aux sollicitations de fatigue ;
- réduction des contraintes admissibles dans les câbles.

Les conditions d'essai de la catégorie d'utilisation A sont moins sélectives que celles de la catégorie B, ce qui devrait permettre une certaine économie sur les ancrages de ces câbles. En revanche, les câbles de précontrainte extradossée sont aussi exposés aux agressions environnementales que les haubans. Il n'y a pas lieu de modifier les spécifications du chapitre 9 sur la partie courante, puisque celles-ci sont essentiellement dictées par des considérations sur la durabilité.

14.8.1. Etats limites ultimes

La tension d'un câble de précontrainte extradossée sous l'effet des combinaisons ELU fondamentales doit vérifier la relation :

$$F_{ELU} \leq \frac{F_{GUTS}}{\gamma_{m1} \gamma_{m2}}$$

Si le procédé de précontrainte extradossée est qualifié par l'essai mécanique de catégorie B défini par le chapitre 11. Le facteur partiel de sécurité γ_{m1} vaut **1,15**. En cas contraire γ_{m1} vaut **1,30**. Du fait de la sensibilité limitée aux effets du vent, le facteur partiel de sécurité γ_{m2} vaut **1,15** pour les câbles de précontrainte extradossée.

Pour des câbles qualifiés selon les recommandations du chapitre 11. on doit alors vérifier $F_{ELU} \leq 0,75 F_{GUTS}$.

14.8.2. Etats limites de service

La tension d'un câble de précontrainte extradossée sous l'effet des combinaisons ELS rares doit vérifier la relation :

$$F_{ELS} \leq 0,60 F_{GUTS}$$

Cette vérification doit être effectuée en situation d'exécution ou sur l'ouvrage en exploitation, pour un câble dont les surtensions sous charges fréquentes ne dépassent pas 50 MPa. En cas contraire, les limitations propres aux haubans de l'article 14.5. s'appliquent.

Plus généralement, la formule ci-dessous est proposée pour établir un continuum entre la précontrainte extérieure ($F_{ELS} \leq 0,8 F_{GUTS}$ à la mise en tension) et les haubans ($F_{ELS} \leq 0,5 F_{GUTS}$) en fonction de la surtension maximale dans le câble sous charges fréquentes, notée $\Delta F_{Fréq}$ et exprimée en MPa :

$$F_{ELS} \leq 0,46 \left(\frac{\Delta F_{Fréq}}{140} \right)^{-0,25} F_{GUTS}$$

Pour un projet donné, la contrainte admissible dans les câbles est fixée par le câble le plus défavorable.

Cette formule prend implicitement en compte les sollicitations en fatigue des câbles, à travers la surtension sous charges fréquentes.

ANNEXES

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 15. RÉFÉRENCES

ARTICLE 15.1. NORMES

NF A35-035 : Produits en aciers - Fils lisses et torons de précontrainte à 7 fils revêtus par immersion à chaud de zinc ou d'alliage zinc-aluminium

NF A47-242 : Câbles, produits tréfilés, étirés, calibrés, profilés et laminés à froid – Fils destinés aux câbles pour appareils de remontées mécaniques et structures suspendues – Spécifications.
Ne doit plus être utilisée pour les câbles de haubanage

NF XP A35 036 : Fils en acier destinés aux câbles porteurs fixes pour les structures de bâtiment et de génie civil". Edition 2000.

NF XP A35 045 : Produits en aciers – Armatures de précontrainte.

NF XP A49-646 (remplace NF A49-542 et NF A49-643) : Tubes en acier – Tubes ronds, carrés et rectangulaires de précision, soudés longitudinalement par induction à partir de produits plats laminés à chaud ou à froid, revêtus ou non – Dimensions – Conditions techniques de livraison.

NF P22-471 : Construction métallique – Assemblages soudés.

NF T30-071 : Peintures – Dégradations des surfaces peintes – Principes généraux d'évaluation de la quantité et de la dimension des types courants de défauts – Désignation du degré de cloquage et d'enrouillement.

NF T54-072 : Plastiques - Tubes en polyéthylène "5" - Spécifications.

NF T60-119 : Produits pétroliers – Détermination de la pénétrabilité au cône des produits paraffineux.

NF T60-128 : Produits pétroliers – Détermination du point de figeage des paraffines, des cires, des vaselines et des {pétrolata} issus du pétrole.

NF X41-002 : Essai au brouillard salé.

NF EN 10002 : Matériaux métalliques – Essai de traction

NF EN 10210 (remplace NF A49-501) : Profils creux pour la construction finis à chaud en aciers de construction non alliés et à grains fins :

- Partie 2 : tolérances, dimensions et caractéristiques du profil.

NF EN 10219 (remplace NF A49-541) : Profils creux pour la construction formés à froid en aciers de construction non alliés et à grains fins :

- Partie 1 : conditions techniques de livraison,

- Partie 2 : tolérances, dimensions et caractéristiques du profil.

NF EN ISO 178 : Plastiques – Détermination des propriétés en flexion.

NF EN ISO 180 : Plastiques – Détermination de la résistance au choc Izod.

NF EN ISO 527 (remplace ISO/R 527) : Plastiques – Détermination des propriétés en traction.

NF EN ISO 868 : Plastiques et ébonite – Détermination de la dureté par pénétration au moyen d'un duromètre (dureté shore).

NF EN ISO 1133 : Plastiques – Détermination de l'indice de fluidité à chaud des thermoplastiques, en masse (MFR) et en volume (MVR).

NF EN ISO 1183 (remplace ISO/R 1183) : Plastiques – Méthodes pour déterminer la masse volumique et la densité relative des plastiques non alvéolaires.

NF EN ISO 2160 : Produits pétroliers – Action corrosive sur le cuivre.

NF EN ISO 3146 : Plastiques – Détermination du comportement à la fusion (température de fusion ou plages de températures de fusion) des polymères semi-cristallins par méthode du tube capillaire et du microscope polarisant.

NF EN ISO 9002 : Systèmes qualité – Modèle pour l'assurance de la qualité en production, installation et prestations associées.

PR NF EN 10264 : Fils et produits tréfilés en acier, fils pour câbles.

ISO 3207 : Interprétation statistique des données – Détermination d'un intervalle de dispersion.

ISO 4437 : Canalisations enterrées en polyéthylène (PE) pour réseaux de distribution de combustibles gazeux.

ISO 6964 : Tubes et raccords en polyoléfines.

ISO/TR 10837 : Détermination de la stabilité thermique du polyéthylène (PE) destiné à être utilisé dans les tubes et raccords pour la distribution du gaz.

ASTM D217 : Standard Test Method for Cone Penetration of Lubricating Grease.

ASTM D445 : Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (the Calculation of Dynamic Viscosity).

ASTM D942 : Standard Test Method for Oxidation Stability of Lubricating Greases by Oxygen Bomb Method.

ASTM D1693 : Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics.

ASTM D3350 : Standard Specification for Polyethylene Plastics Pipe and Fittings Materials.

Règlement de la marque NF 114 : Tubes en polyéthylène.

ARTICLE 15.2. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] *Maurice Godet's Third Body Approach*
Y. BERTHIER, Proceedings of the 22nd Leeds-Lyon symposium
- [2] *The Third Body Concept : Introduction of Tribological Phenomena* D. DOWSON,
Tribology Série 31 pp. 21-30, September 1996, Elsevier Eds
- [3] *L'Usure et la fissuration induite en petits débattements : gènèse, formalisme et remèdes*
Y. BERTHIER, L. VINCENT, M. GODET, Mécanique, Matériaux, Electricité, Vol 428,
Octobre 1988
- [4] *Maintenance et réparation des ponts*
sous la direction de J.A. CALGARO et R. LACROIX, Presses de l'ENPC, 1997.
(voir notamment le chapitre *Pathologie des câbles de suspension* rédigé par
J.P. GOURMELON)
- [5] *La construction du pont à haubans de Coatzacoalcos II – Annexe : Haubans à gaine
métallique injectée*
A. CHAUVIN, Annales de l'ITBTP, Janvier 1986.
- [6] *Developments in the Technology of Bridge Stays*
A. CHAUVIN, 10th International Congress of the FIP, New Delhi, Fevrier 1986.
- [7] *Etude mathématique du phénomène d'excitation paramétrique appliqué aux haubans
de ponts*
H. CLEMENT, C. CREMONA, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et
Chaussées, Série OA18, LCPC Paris, Janvier 1996
- [8] *Structures haubanées, contraintes de flexion locale dans les haubans*
J. COMBAULT, F. CONVERSY, P. THIVANS Conférence FIP, 1982
- [9] *Retensioning the Cable Stays of the Brotonne Bridge*
J. COMBAULT, congrès de Bangkok, Vol. 2, 1987.
- [10] *Structures haubanées, contraintes de flexion locale dans les haubans*
J. COMBAULT, F. CONVERSY, P. THIVANS, La Technique Française du Béton
Précontraint, 11^e congrès de la FIP à Hambourg, 1990.
- [11] *External Prestressing in Structures, Non-linear calculation Tests of Prestressed
Beams*
under the direction of E. CONTI and R. TARDY, AFPC Workshop on Behaviour of
External Prestressing in Structures, Saint-Rémy les Chevreuse, France, Juin 1993.
- [12] *Courbe universelle pour le dimensionnement d'amortisseurs en pied de haubans*
C. CREMONA, Revue Française de Génie Civil, Vol. 1, n°1/1977, pages 137 à 159
- [13] *A Modern Course in Aeroelasticity*
E.H. DOWEL, H.C. CURTISS, R.H. SCANLAN, R. SISTO, Kluwer Academic
Publishers, 1989
- [14] *Effets du vent sur les grands ponts suspendus et à haubans : évaluation des risques
d'excitation des vibrations des haubans du Pont de Normandie*
J.C. FOUCRIAT, Annales AFPC – ITBTP, Octobre 1988

- [15] *Bending of Stay Cables*
A. FURST, P. MARTI, H.R. GANZ, IABSE, Fevrier 2001
- [16] *Cable Supported Bridges, Concept and Design*
N. GIMSING, John Wiley & Sons England, 1997.
- [17] *Cable-stayed Bridges, Effect of Breaking of a Cable*
E. HYTTINEN, J. VALIMAKI, E. JARVENPAA, Conférence AFPC sur les ponts suspendus et à haubans, Deauville, France, Octobre 1994, volume II pages 303-310.
- [18] *Cable Structures*
M. IRVINE, MIT Press Boston MA, 1981.
- [19] *New Concept on Mechanism and Suppression of Wake-Galloping of Cable-Stayed Bridges*
Y. KUBO, K. KATO, H. MAEDA, K. OIKAWA, T. TAKEDA, Conférence AFPC sur les ponts suspendus et à haubans, Deauville, France, Octobre 1994, volume II pages 491-498.
- [20] *Vibration Amplitudes Caused by Parametric Excitations of Cables Stayed Structures*
J.L. LILIEN, A. PINTO DA COSTA, Journal of Sound and Vibration, 174 (1) pp. 69-90, 1994.
- [21] *Construction and Design of Cable-Stayed Bridges*
W. PODOLNY, John B. SCALZI, Willey & Sons, 2nd Edition 1986.
- [22] *Précontrainte Extérieure*
Guide technique SETRA, Février 1990.
- [23] *Design of Steel Cables against Free-Bending Fatigue at Terminations*
M. RAOOF, The Structural Engineer, volume 71/n° 10/18 may 1993, pp. 171-178.
- [24] *Réflexions sur la résistance à la fatigue des haubans : détermination des conditions de l'essai de réception des haubans et des ancrages du Pont de Seyssel*
M. VIRLOGEUX, G. LACOSTE, J.F. FONTAINE, D. LE FAUCHEUR, Journées d'études AFPC sur la construction du pont de Seyssel, Mai 1986.
- [25] *Erection of Cable-Stayed Bridges : the Control of the Desired Geometry*
M. VIRLOGEUX, Conférence AFPC sur les ponts suspendus et à haubans, Deauville, France, Octobre 1994, volume II pages 321-350.
- [26] *Cable Vibration in Cable Stayed Bridges*
M. VIRLOGEUX, Bridge Aerodynamics, Larsen Esdahl Editors, Rotterdam, 1998.
- [27] *About Prestressing and Cable-staying*
M. VIRLOGEUX, Bridge Engineering Conference 2000, Sharm El-Sheikh, Egypt, Mars 2000, pages 159-169.
- [28] *Ponts haubanés*
R. WALTHER, B. HOURIET, W. ISLER, P. MOÏA, Presses Polytechniques Romandes.

CHAPITRE 16. DÉFINITIONS ET NOTATIONS

ARTICLE 16.1. GLOSSAIRE

Aiguille (stabilizing cable) :

câble reliant transversalement des haubans entre eux pour leur éviter de vibrer sous les effets du vent.

Amortisseur (damper) :

dispositif fixé sur le hauban et permettant d'absorber et dissiper, par viscosité ou frottement, de l'énergie cinétique de vibration du hauban. L'amortisseur peut être attaché au hauban et la structure, ou être connecté au hauban seulement et fonctionner par inertie.

Ancrage (anchorage, socket) :

dispositif constitué de tous les éléments et accessoires permettant de maintenir un hauban tendu, de transmettre l'effort du hauban à la structure au niveau du tablier ou d'un pylône et de garantir la pérennité des performances du hauban pour la durée spécifiée. On distingue l'ancrage actif (stressing anchorage), où la mise en tension est effectuée, et l'ancrage passif (fixed anchorage).

Armature (main tensile element) :

élément transmettant l'effort de traction du hauban entre les ancrages ou selles de déviation (toron, fil, etc.)

Barrière (barrier) :

tout obstacle matériel qui protège les armatures du hauban. Une barrière peut agir de façon physique (étanchéité empêchant l'humidité d'atteindre les armatures), chimique (protection sacrificielle ou par passivation), ou de façon combinée.

On distingue barrière interne, au contact des armatures, et barrière externe (external barrier) qui est exposée à l'environnement extérieur du hauban.

Barrière emboîtée (nested barriers) :

barrière doublant une autre barrière.

Câble (cable) :

de façon générale, l'ensemble des armatures, dans la partie courante du hauban.

CCAG : Cahier des Charges Administratives Générales

CCTG : Cahier des Charges Techniques Générales

Classe de résistance caractéristique ou garantie f_{rg} (ou f_{GUTS}) :

grandeur, homogène à une contrainte, indiquant la résistance en traction par unité de surface d'une armature, conformément à une norme de référence.

Clavette (wedge, jaw) :

élément métallique, groupé par ensemble de deux, trois ou quatre, pour constituer un mors permettant l'ancrage d'un toron par coincement dans un pot conique alaisé dans un bloc d'ancrage.

CMH : chargé de la mise en œuvre des haubans (voir chapitre 12.)

Coefficient de traction déviée :

l'essai de traction déviée, conformément à la norme NF XP A35-045 consiste à mesurer la résistance à rupture F_{dev} d'un toron dévié d'un angle α par un mandrin. Le coefficient de traction

déviée s'exprime alors (en %) par l'expression $CD = \left(\frac{F_{rg} - F_{dev}}{F_{rg}} \right) \times 100$

Colmatage (blocking agent) :

remplissage, partiel ou total, au sein des armatures ou entre les armatures et leur gaine éventuelle, par un produit visqueux qui empêche la circulation d'eau au contact des armatures et permet les débattements entre éléments d'armature.

Commettage (stranding) :

action d'enrouler les fils des couches successives d'un toron multi-couches pour fabriquer ce toron.

Courbe de fatigue ou de Wœhler (Wœhler curve) :

courbe donnant la durée de vie (nombre de cycles, en abscisse, échelle logarithmique) en fonction de l'étendue de fatigue (en ordonnée), pour des cycles d'étendue constante.

Déviateur (deviator) :

collier enserrant le câble à son entrée dans la zone d'ancrage, et provoquant un changement de direction des torons ou des fils constitutifs d'un hauban MTP ou MFP pour les faire diverger et les espacer dans l'ancrage.

Diagramme de Goodman-Smith :

diagramme donnant l'étendue de contrainte normale $\Delta\sigma$ que peut supporter un hauban pendant 2 millions de cycles, en fonction de la contrainte de traction maximale σ_{max} ou de la contrainte de traction moyenne $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$.

DIUO : dossier d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (voir chapitre 13.)

Durée de vie en fatigue (fatigue life) :

nombre de cycles de sollicitations d'amplitude donnée, que le hauban doit supporter sans rupture.

EDS : entreprise distributrice spécialisée (voir chapitre 12.)

ESC (environmental stress cracking) :

fissuration par contraintes liées à l'environnement (voir article 3.2.3.2.)

Etendue d'un cycle de fatigue (fatigue range) :

différence entre la contrainte maximale σ_{max} (respectivement la déviation angulaire maximale α_{max}) et la contrainte minimale σ_{min} (la déviation angulaire minimale α_{min}). L'étendue d'un cycle de fatigue vaut deux fois l'amplitude de ce cycle, définie comme la différence entre les valeurs maximales et les valeurs moyennes.

Fil (wire) :

fil d'acier individuel, représentant le plus petit constituant d'un câble, généralement rond (sauf les fils non circulaires des câbles clos), dont la haute limite élastique est obtenue par tréfilage à froid.

FIP (fretting fatigue) : fatigue induite par petits débattements (voir chapitre 3.)

Gaine individuelle (sheath) :

tube en matière plastique (polyéthylène) entourant continûment l'armature du hauban, généralement toron à sept fils, et constituant une barrière.

Gaine générale (duct or stay pipe) :

enveloppe tubulaire extérieure, en acier ou en matière plastique (polyéthylène), entourant l'ensemble des armatures du hauban. Cette gaine n'a pas nécessairement un rôle de barrière, mais améliore le comportement aérodynamique du hauban et son aspect esthétique.

Galfan :

alliage de zinc et d'aluminium parfois utilisé en substitution du zinc comme dépôt de protection métallique (galfanisation).

Guide :

dispositif de guidage situé à quelques mètres de l'ancrage, et constituant un point fixe, bloquant totalement ou partiellement les déplacements transversaux du hauban.

Hauban (stay cable) :

ensemble comprenant le câble, les ancrages, les gaines et tous les dispositifs de protection anticorrosion, à l'exclusion des dispositifs de stabilisation transversale (aiguilles) et des armoisseurs.

Longueur d'ancrage (anchorage length) :

longueur de câble qui sert à ancrer le hauban, incluant la longueur où les armatures élémentaires sont déviées dans les pièces d'ancrages et la longueur d'armature non tendue en arrière de l'ancrage (voir chapitre 10.)

Longueur libre (free length) :

longueur de hauban entre ses deux ancrages ou entre un ancrage et une selle de déviation, excluant toute zone de transition vers l'ancrage ou de fixation d'amortisseur (voir chapitre 10.)

Manchon filé (swage) :

manchon cylindrique permettant d'ancrer un toron autour duquel il est enfilé et coincement par déformation dans une filière.

MFP : câble multi-fils parallèles (voir chapitre 9.)

MTP : câble multi-torons parallèles (voir chapitre 9.)

PEHD : polyéthylène à haute densité.

Presse-étoupe (stuffing box) :

dispositif placé en avant de l'ancrage de certains procédés de haubanage, traversé par les armatures du hauban, et permettant de séparer de façon étanche la zone courante de la zone d'ancrage, pour confiner un produit d'injection par exemple.

Résistance caractéristique ou résistance garantie F_{rg} (Guaranteed ultimate tensile strength, F_{GUTS}) :

résistance en traction garantie d'une armature, définie comme le produit de la classe de résistance f_{rg} de l'armature par sa section nominale A_k .

Résistance effective $f_{réel}$:

grandeur, homogène à une contrainte, définie comme le rapport de la résistance réelle $F_{réel}$ par la section nominale A_k .

Résistance en fatigue (fatigue limit) :

étendue de contrainte normale $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ que peut supporter un hauban pendant 2 millions de cycles sans rupture et, par convention, en dessous de laquelle la durée de vie en fatigue est infinie.

Résistance réelle $F_{réel}$ (Actual ultimate tensile strength, F_{AUTS}) :

résistance effective en traction d'une armature, définie comme la moyenne de trois résultats de mesure de résistance ultime par essai de traction à rupture.

Section nominale S (nominal cross-section) :

aire d'une section droite d'une armature définie :

- soit comme la somme des sections droites des fils constitutifs pour les torons multi-couches ;
- soit par pesée et division par une masse spécifique conventionnelle, pour les torons et les fils de précontrainte.

Selle de déviation (saddle) :

dispositif appuyé directement sur la structure, généralement au niveau d'un pylône, comprenant une ou plusieurs gorges arrondies permettant de dévier un ou plusieurs haubans, et éventuellement de transmettre une partie de leur tension à la structure, en vue de l'utilisation de haubans continus sans ancrages de pylône.

Toron (strand) :

terme générique incluant :

- les torons, dits de précontrainte, à sept fils (six fils enroulés en hélice autour d'un fil central droit) ;
- les torons multi-couches, assemblages de fils enroulés en hélice autour d'un ou plusieurs fils d'âme, en plusieurs couches successives, soit à pas inversés pour réduire le couple de torsion, soit à fils enroulés parallèlement pour éviter les croisement de fils.

TMC : toron multi-couches (voir chapitre 9.)

UIP (fretting corrosion) : usure induite par petits débattements (voir chapitre 3.)

Vérin (jack, ram)

Zone de transition :

partie du hauban comprise entre la zone d'ancrage et la partie courante, comprenant notamment les éventuels dispositifs de guidage et d'amortissement.

ARTICLE 16.2. NOTATIONS

c	célérité des ondes transversales dans un hauban
d	distance horizontale entre ancrages
g	constante de gravité (10 m/s ²)
h	distance verticale entre ancrages
j	
k	nombre d'onde, coefficient de dilatation thermique
l_0	longueur à tension nulle, ou longueur à vide ou longueur neutre
l	longueur de la corde
q	poids linéique du hauban, y compris les éléments de protection anticorrosion
A_n	amplitude d'ordre n du hauban
C_D	coefficient de traînée
C_L	coefficient de portance
D	diamètre extérieur du câble
E	module d'Young du câble
F	tension du câble au point I de flèche maximale, ou tension suivant la corde
F_M	vecteur tension au point courant M
F_{ref}	tension de référence
H	composante horizontale de F_M (constante le long du profil)
I	inertie de flexion du câble
K	raideur du hauban
L	longueur développée de la chaînette
N_n	fréquence propre d'ordre n du hauban
R_e	nombre de Reynolds
S	section nominale résistante de l'armature du hauban
S_t	nombre de Strouhal
S_c	nombre de Scrutton
T_n	période propre d'ordre n du hauban
U	vitesse du vent
V_M	composante verticale de F_M au point courant M
α	angle du hauban avec la direction horizontale
δ	décrément logarithmique (en %)
ε	prédéformation d'un hauban
γ	constante d'amortissement visqueux
κ	coefficient de remplissage
λ^2	paramètre adimensionnel d'Irvine
μ	masse linéique du hauban, y compris les éléments de protection anticorrosion
ν	viscosité cinématique de l'air
ρ	densité de l'air
ω	déflexion angulaire par rapport à la direction de l'ancrage
ω_n	pulsation propre d'ordre n du hauban
ξ	amortissement rapporté au critique (en %)
Ω	pulsation d'excitation

Page laissée blanche intentionnellement

Page laissée blanche intentionnellement

Page laissée blanche intentionnellement

Ce document est propriété de l'Administration,
il ne pourra être utilisé ou reproduit, même partiellement,
sans l'autorisation du SETRA

achevé d'imprimer à l'Imprimerie de la Centrale - BP 78 - 62302 - LENS

46, avenue
Aristide Briand
B.P. 100
92225 Bagneux
Cedex – France
Téléphone :
01 46 11 31 31
Télécopie :
01 46 11 31 69
Internet :
<http://www.setra.equipement.gouv.fr>

Au début de l'année 1997, la Commission Interministérielle de la Précontrainte (CIP) a décidé la constitution d'un groupe de travail chargé d'étudier les problèmes technologiques liés aux haubans, afin de mettre en place un système d'agrément semblable à celui qui s'applique aux procédés de précontrainte.

Le présent guide fait le point sur l'état de l'art et donne des recommandations sur la conception, la qualification et la mise en œuvre des systèmes de haubanage. Il a été rédigé en tirant parti des connaissances accumulées sur des ponts à haubans construits depuis trente ans en France ou à l'étranger. Cela comprend des ponts à haubans de grandes dimensions, tels que le pont de Brotonne, le pont de Normandie, le Second Pont sur la Severn, le pont Vasco de Gama, etc. mais aussi une grande variété d'ouvrages de dimensions plus modestes.

La technologie de haubanage décrite dans ce guide concerne principalement les ponts à haubans, dont les câbles se caractérisent par des surtensions importantes, des sollicitations en fatigue et une exposition directe à l'environnement. Plus généralement, on trouvera dans ce guide des recommandations utiles pour tous les câbles directement exposés aux agressions de l'environnement, et notamment les suspentes des ponts bowstring, les câbles de précontrainte extradossés ou sous-bandés, ainsi que les câbles utilisés dans toute structure haubanée de génie civil : couverture de stades, pylônes, etc.

En revanche, l'utilisation de réseaux de câbles reliés les uns aux autres est hors du champ de ce document, qui ne traite donc pas des structures spatiales à câbles ni de la technologie des ponts suspendus. En outre, les selles de déviation de haubans sont abordées seulement par quelques recommandations sur leur dimensionnement mais leur usage est déconseillé, du fait de leur incidence sur la durabilité des haubans et à cause de difficultés de maintenance et de remplacement.

Early in 1997, the French Interministerial Commission on Prestressing (Commission Interministérielle de la Précontrainte - CIP) set up a working group to study the technological problems involved in stay cables and to establish an approval procedure similar to that implemented for prestressing systems.

The working group drafted these Recommendations, a state-of-the-art review advising on the design, qualification, and implementation of stay-cable systems. It calls on the experience acquired with cable-stayed bridges in France and elsewhere in the last thirty years or so. This experience includes large cable-stayed bridges such as the Brotonne bridge, the Pont de Normandie, the Second Severn Crossing, and the Vasco de Gama bridge, but also involves a wide range of smaller bridges.

The cable technology described in these Recommendations principally concerns cable-stayed bridges, the cables of which are characterized by large variations in tension, fatigue effects, and direct exposure to the elements. More generally, it is hoped the recommendations will be of use for all cables exposed to climatic aggression, particularly to the ties of bowstring bridges, extradosed or intradosed prestressing tendons, and cables used in any stayed civil engineering structures, such as stadium roofs, masts, etc.

On the other hand, the applications of interconnected cable networks are beyond the scope of these Recommendations which do not, therefore, deal with cabled spaceframe structures or suspension-bridge technology. In addition, stay-cable saddles are addressed only in the form of a few recommendations on design, but using them is advised against, essentially because of maintenance and replacement difficulties.