

Les ponts suspendus en France



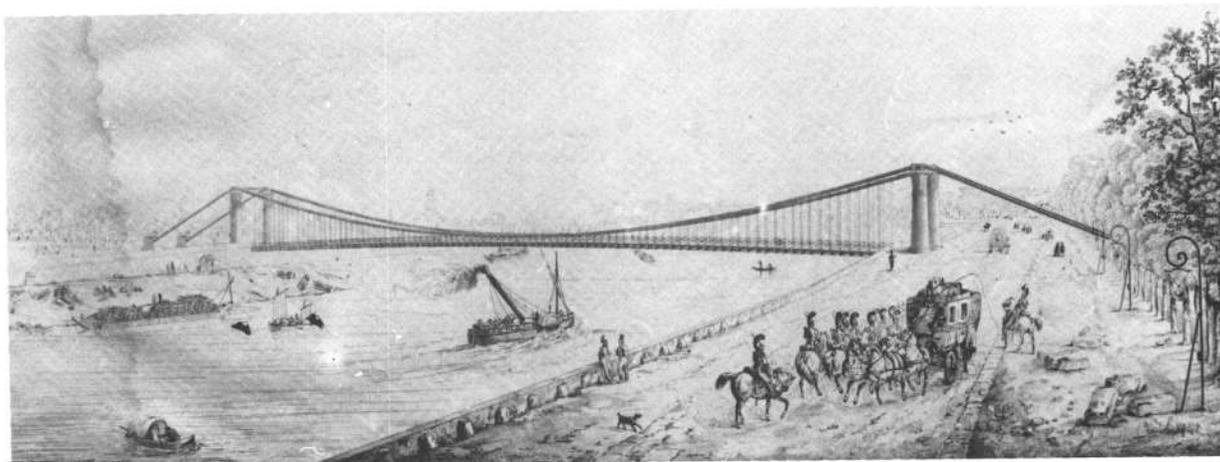
laboratoire central
des ponts et chaussées



service d'études techniques
des routes et autoroutes

*Le pont suspendu de Cubzac sur la Dordogne
(Dessin d'Émile Martin - 1841).*

Les ponts suspendus en France



*Pont des Invalides.
Extrait des Planches.
Mémoire de Navier. Ed. 1830. Bibliothèque ENPC.*

Document réalisé et diffusé par :

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, boulevard Lefebvre - 75732 PARIS CEDEX 15 - FRANCE
☎ (1) 40 43 52 26 - Télécopieur : (1) 40 43 54 98 - Télex : lcpari 200361 f

Le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art
46, avenue Aristide-Briand - BP 100 - 92223 BAGNEUX - FRANCE
☎ (1) 42 31 31 31 - Télécopieur : (1) 42 31 31 69 - Télex : 260763 SETRA BAGNX

Décembre 1989

Ce document a été élaboré à l'initiative de Madame Brachet (LCPC) et de Monsieur Lefranc (SETRA).

Composition du groupe de travail :

MM. André, Bot (LCPC), Bouvy (CETE de Lyon), Brevet (LCPC), Brignon (SETRA), Carrière (Entreprise Baudin-Chateauneuf), Chatelain (LCPC), Deneuille (SETRA), Desmery (Entreprise Arnodin), Gourmelon (LCPC), Lafuente (Laboratoire de Bordeaux), Lecroq (CETE de Lyon), Méhue (SETRA), Raoul (SETRA), Robert (LCPC), Roche (SETRA).

Le secrétariat de groupe a été assuré par M. Bot (LCPC), et la rédaction finale du document par MM. Brignon (SETRA) et Gourmelon (LCPC).

SOMMAIRE

CHAPITRE I - INTRODUCTION	5
PREMIÈRE PARTIE	
CHAPITRE II - GÉNÉRALITÉS ET CALCUL	
1. Différents types de ponts suspendus	9
2. Calcul des ponts suspendus	10
CHAPITRE III - SUSPENSION	
1. Introduction	25
2. Aciers utilisés - Mode d'élaboration des fils	25
3. Les câbles	26
4. Dispositions géométriques des câbles	29
5. Les suspentes	30
6. Ancrages et organes d'attache des câbles et suspentes	31
7. Réglage d'une suspension	40
8. Changement de suspension	45
CHAPITRE IV - INFRASTRUCTURE DES PONTS SUSPENDUS	
1. Introduction	55
2. Les fondations, piles et culées	55
3. Les pylônes	56
4. Les massifs et chambres d'ancrage	57
CHAPITRE V - TABLIERS DES PONTS SUSPENDUS	
1. Poutres de rigidité	61
2. Pièces de pont et longerons	65
3. Les platelages	67
CHAPITRE VI - APPAREILS D'APPUI	
1. Introduction	73
2. Rôle des appareils d'appui	74
3. Différents types d'appareils d'appui	74
4. Disposition d'ensemble des appareils d'appui	76
5. Désordres présentés par les appareils d'appui	79
6. Conclusion	79
CHAPITRE VII - PROTECTION DE LA SUSPENSION	
1. Introduction	81
2. Examen de la protection des câbles et accessoires	81
3. Réparation de la protection des parties courantes (câbles en fils clairs)	83
4. Protection des zones de câbles sous colliers	86
5. Protection des suspentes	87
6. Protection des culots d'ancrage	87
7. Protection des câbles en fils galvanisés	88

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE VIII – LA SURVEILLANCE DES PONTS SUSPENDUS

1.	Introduction	91
2.	Méthodologie de visite et d'inspection	91
3.	Opérations tendant à apprécier le comportement mécanique de l'ouvrage	91
4.	Opérations de détection des dommages dus à la corrosion	93
5.	Autres opérations de surveillance et d'entretien	95
6.	Moyens exceptionnels de surveillance	95
7.	Vérifications particulières	96
8.	Moyens d'accès	96

TROISIÈME PARTIE

ANNEXES

1.	Documentation bibliographique	99
2.	Liste des textes réglementaires concernant la surveillance et l'entretien des ponts suspendus (anciens et nouveaux)	99
3.	Liste des ponts suspendus français, arrêtée au 1 ^{er} juillet 1987	100
4.	Notices techniques sur les moyens de contrôle et de surveillance des câbles	106
5.	Notice sur les méthodes d'évaluation de l'agressivité de l'environnement dans un site donné	112
6.	Systèmes de protection anticorrosion sélectionnés après essais en laboratoire	112

CHAPITRE I

INTRODUCTION

“La connaissance ne se justifie que si on la partage avec les autres”

Sénèque

La France possède, à l'heure actuelle, un patrimoine de quelque deux cents ponts suspendus dont certains datent du siècle dernier et dont le plus récent, le pont d'Aquitaine à Bordeaux, a été mis en service en mai 1967.

La localisation actuelle de ces ouvrages en trois zones principales : vallée de la Loire, vallée du Rhône et ses affluents, sud-ouest de la France, ne doit pas laisser croire que cette technique était réservée aux cours d'eau particulièrement larges ou aux régions particulièrement accidentées.

En fait, ce type de structure permettait aisément de franchir, sans ou avec le minimum d'appuis en rivière (toujours délicats à réaliser), des brèches supérieures à 50 m. Les ponts suspendus d'une centaine de mètres d'ouverture étaient fort courants et la capitale en compta même près d'une dizaine. La répartition géographique était homogène, et si le nord-est de la France en a été plus particulièrement démunie, il faut y voir la trace, principalement, des combats de la Première Guerre mondiale.

Après, les progrès des diverses techniques telles que fondations en rivière, ossatures métalliques, et plus récemment l'essor du béton précontraint, ont vu la construction des ponts suspendus tomber en désuétude en France ; les derniers exemples que l'on connaisse sont les ponts de Tancarville et de Bordeaux, de portées centrales respectives de 608 et 394 mètres.

Après la Seconde Guerre mondiale, on assista à la renaissance d'un "ancêtre", le pont à haubans. Abandonnée à la suite de nombreux désordres et sous l'influence de Navier au profit des ponts suspendus, cette technique reprit essor, en Allemagne, aux environs des années 50, puis, plus récemment en France où le pont de Saint-Nazaire – Mindin en Loire-Atlantique (158 m, 404 m, 158 m) a été achevé en 1975, et le pont de Brotonne sur la Seine (143,50 m, 320 m, 143,50 m) en 1977.

On le voit, le domaine économique des ponts suspendus recule et semble être de plus en plus limité aux très grandes brèches à franchir d'une seule portée, tel le Bosphore ou les grands estuaires (Severn, Forth, Humber, etc.).

Pourquoi, alors, un *Bulletin technique* sur un type d'ouvrages peu susceptible d'avenir sur le territoire métropolitain ?

La raison en est double. Tout d'abord il convient de ne pas laisser à l'abandon le patrimoine existant et, sauf exigences particulières dues au trafic, la plupart des ouvrages suspendus méritent d'être conservés et entretenus.

Ensuite, et corollairement, parce qu'une politique d'entretien implique que l'on connaisse bien le fonctionnement des ouvrages à entretenir : disons tout de suite que cela n'est pas le cas, à l'heure actuelle, pour les ponts suspendus.

Ces derniers ont ceci de particulier qu'ils appartiennent à la fois au domaine du génie civil et à celui de la mécanique ; ils datent, pour la plupart, d'une époque où les constructeurs de ponts étaient tout ensemble ingénieurs, architectes et mécaniciens. L'heure est à la gestion, et rares sont ceux qui connaissent l'importance et le rôle de tel ou tel organe particulier d'un ouvrage suspendu.

Les chapitres qui vont suivre ont donc l'ambition de servir de guide à tous ceux qui ont, dans leurs attributions, la gestion d'un ou plusieurs ouvrages suspendus.

Sans être exhaustif (on ne le pourrait guère, tant les divers constructeurs ont fait preuve d'imagination) ce *Bulletin technique* s'efforce donc d'être une sorte de "Précis d'anatomie critique des ponts suspendus", permettant aux maîtres d'oeuvre d'aborder d'un pied un peu plus sûr les aspects méconnus de leurs ouvrages.

Dans cet esprit, le *Bulletin technique* est articulé en trois grandes parties :

- généralités et description critique ;
- surveillance : méthodologie et moyens ;
- annexes techniques.

Après un chapitre "Généralités" où sont données une description sommaire ainsi que les principes de fonctionnement des principaux types de ponts suspendus, de même que les principes de calcul et les hypothèses à prendre en compte, une série de chapitres reprend point par point les différentes dispositions constructives rencontrées avec leurs avantages et leurs inconvénients. Il convient d'y porter une attention particulière car, contrairement à la plupart des autres structures, il y a peu ou pas d'organes "accessoires" dans un pont suspendu ; chacun a un rôle à jouer, et un désordre ou une anomalie de fonctionnement, d'apparence mineure, peut, à terme, entraîner sinon la ruine, du moins des désordres graves dans la structure principale : tel est le cas des selles d'appui mobiles en tête de pylône, souvent bloquées, et dont l'immobilité peut entraîner des surtensions dans les câbles, des distorsions au niveau du tablier, voire des désorganisations dans les pylônes.

La deuxième partie traite de la méthodologie de surveillance et des moyens disponibles. C'est le fil conducteur des visites qui doit permettre de déceler les désordres ou, plus subtilement, d'apprécier les indices pouvant en laisser supposer. En effet, plus que toute autre structure, le pont suspendu se prête à la "constatation indirecte" où, par exemple, une anomalie dans le tracé d'une poutre de rigidité va permettre de remonter à un désordre de la suspension ou de l'ancrage.

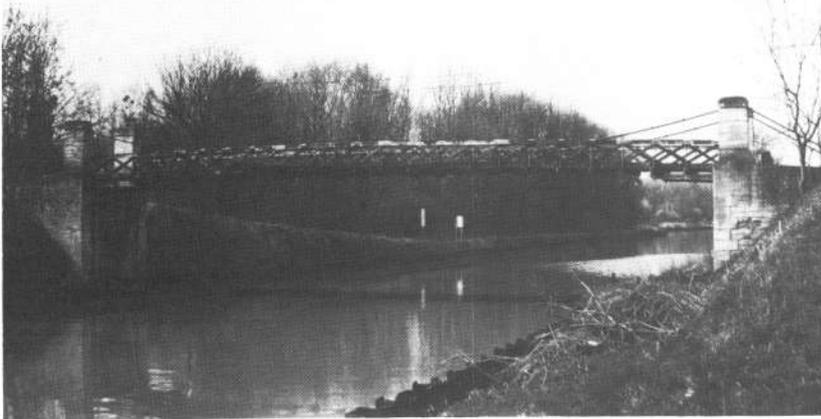
Ainsi le visiteur d'ouvrages peut-il, à la rigueur, suivre le fil de cette deuxième partie sans craindre d'oublier un point capital ; plus curieux, ce qu'il faut souhaiter, il se reportera à la première partie qui lui permettra de juger de l'adéquation des dispositions constructives qu'il rencontrera.

La troisième partie, enfin, est constituée d'annexes techniques détaillées, d'ordre général comme la liste des textes réglementaires ou celle des ponts suspendus (cette dernière n'étant pas exhaustive), ou d'ordre particulier comme les notices ou les spécifications techniques. Ce sont là des textes dépassant la

gestion courante des ouvrages, mais qui doivent servir de références ou de critères d'appréciation.

Dans son ensemble, ce *Bulletin technique* ne se présente pas comme un texte réglementaire, mais comme un ouvrage didactique venant en complément du fascicule 34 "Ponts suspendus et à haubans" figurant dans la deuxième partie de l'Instruction technique d'octobre 1979, pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art.

Conçu sous la double forme d'analyse critique et de guide de visite, il aura atteint son but s'il permet, à ceux qui en ont la charge, de mieux connaître leurs ouvrages, d'en bien comprendre le fonctionnement et de faire appel, en tant que de besoin, aux spécialistes et aux techniques disponibles à l'heure actuelle.



Pont d'Esby (Seine-et-Marne).



Pont de Tancarville (Seine-Maritime).

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS ET CALCUL

II-1 - DIFFÉRENTS TYPES DE PONTS SUSPENDUS

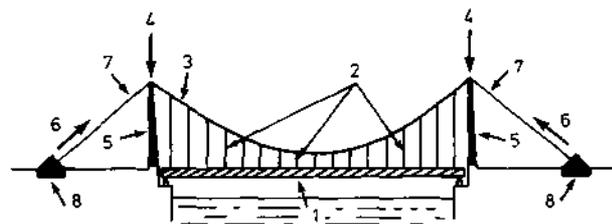
Le principe de fonctionnement d'un pont suspendu peut être schématisé de la façon suivante (fig. II-1) :

- un tablier assure la continuité de la voie portée et la répartition des charges,
- des suspentes supportent le tablier et transmettent les efforts aux câbles,

- les câbles, d'allure parabolique, assurent la fonction porteuse ; les efforts sont décomposés en une réaction verticale absorbée par des pylônes, et un effort de tension transmis par des câbles de retenue amarrés sur des massifs d'ancrage.

Dans le cas général, les câbles de retenue, situés entre les ancrages et les pylônes, ne supportent pas de charge verticale. Dans certains cas, les suspentes verticales sont complétées par des haubans inclinés, afin de réduire les déformations du tablier (fig. II-2). C'est selon ce schéma qu'ont été construits la plupart des ponts suspendus de moyenne portée, à une seule travée, existant en France.

Le passage des charges sur l'ouvrage, du fait de l'augmentation des efforts, entraîne un allongement élastique des câbles porteurs et de retenue ; il est donc nécessaire de permettre le déplacement du point d'application de la réaction verticale en tête de pylône. Le plus fréquemment, les pylônes, en maçonnerie ou en béton, sont encastrés à leur base et le câble prend appui par l'intermédiaire de selles (ou chariots) munies de galets de roulement autorisant ces déplacements en réduisant au maximum les efforts horizontaux (fig. II-3). Dans un certain nombre de cas les pylônes, en acier ou en béton, sont articulés à leur base ; les câbles sont alors solidarisés aux pylônes et les déplacements



- | | |
|----------------------|---------------------|
| 1 Tablier | 5 Pylônes |
| 2 Suspentes | 6 Effort de tension |
| 3 Câbles | 7 Câbles de retenue |
| 4 Réaction verticale | 8 Massifs d'ancrage |

Fig. II-1

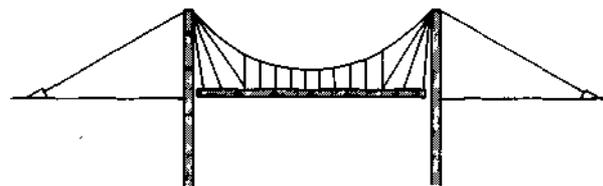


Fig. II-2

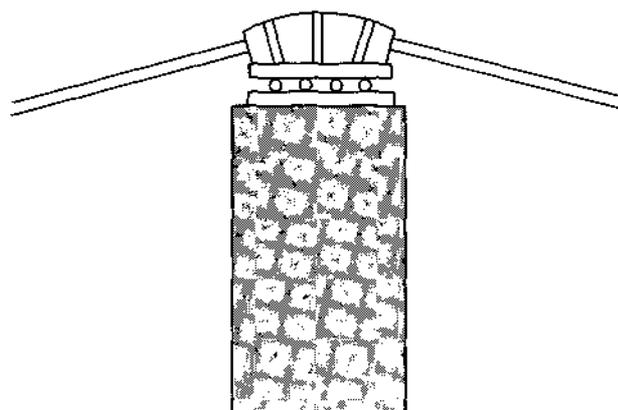


Fig. II-3

sont rendus possibles par l'inclinaison de ces derniers. Enfin, il existe des pylônes souples, encastrés à leur base, dont la flexibilité est suffisante pour supporter sans dommage les déformations des câbles.

Lorsque les brèches à franchir étaient importantes, sur la Loire par exemple, on a construit des ponts suspendus à travées multiples (fig. II-4) où ces déplacements posent un problème particulier. En effet, si les câbles paraboliques reposent sur les pylônes par l'intermédiaire de chariots mobiles indépendants, une charge appliquée sur une travée provoque une descente de cette travée et une montée des travées adjacentes, ainsi qu'un important déplacement des chariots. Pour limiter ce phénomène, ces derniers seront reliés entre eux par des câbles de tête.

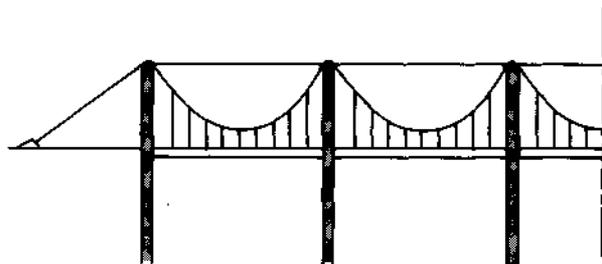


Fig. II-4- Pont suspendu à câbles de tête.

Dans un certain nombre de cas, on a construit des ouvrages à deux travées ou plus, sans câble de tête (fig. II-5). Les câbles paraboliques se croisent au sommet du pylône central et redescendent verticalement pour venir s'ancrer sur une pièce, appelée briquet, fixée dans le corps de pile, sa partie verticale étant appelée câble de briquet. Dans ce cas, le pylône est mis en flexion sous l'effet des surcharges dissymétriques ; il y résiste grâce aux câbles qui apportent une précontrainte extérieure. Ce type d'ouvrage se rencontre surtout sur la Saône.

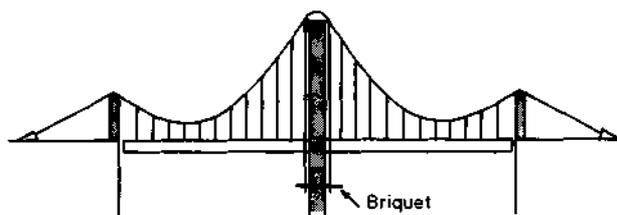


Fig. II-5- Pont suspendu à câbles de briquet.

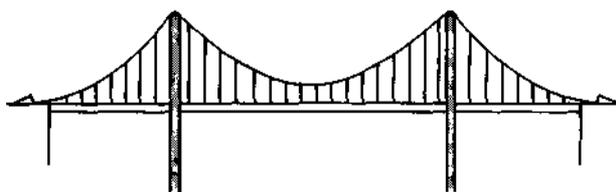


Fig. II-6- Ouvrage à trois travées suspendues (Tancarville-Bordeaux).

La dernière grande famille est la plus moderne. L'ouvrage, qui est schématisé par la figure II-6, s'apparente soit au pont de Tancarville, soit au pont

de Bordeaux. L'ouvrage comporte trois travées suspendues, les travées de rives étant soit indépendantes, soit solidaires de la travée centrale. Dans les ponts français de ce type, les pylônes sont encastrés à leur base et les câbles sont reliés à la tête des pylônes, les déplacements dus aux variations de tension dans les câbles étant possibles grâce à la flexibilité des pylônes.

II-2 - CALCUL DES PONTS SUSPENDUS

Depuis 1823, date du premier mémoire de Navier sur les ponts suspendus, document qui posait les principes fondamentaux de la conception et du calcul de ces ouvrages, le calcul des ponts suspendus a donné lieu à de nombreuses études qui ont conduit à la mise au point de méthodes très élaborées. Si ces méthodes étaient assurément complexes pour une exploitation manuelle, l'emploi de programmes informatiques en autorise aujourd'hui une mise en oeuvre rapide et économique qui permet une détermination aisée des sollicitations.

Lorsqu'on souhaite vérifier un ouvrage en tenant compte de son état et du trafic qu'il supporte, les moyens de calcul ne constituent donc plus un obstacle. En réalité, les difficultés proviennent :

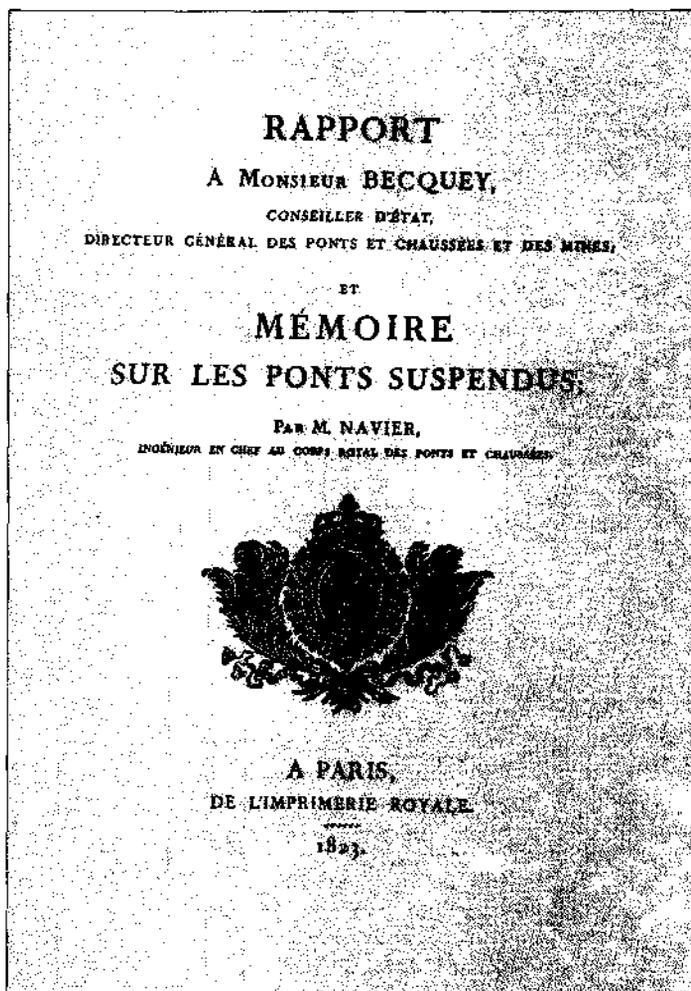
- de la détermination des données à introduire dans le calcul :

- caractéristiques géométriques des pièces qui peuvent être différentes de celles figurant dans le dossier de construction, lorsque celui-ci est disponible,
- caractéristiques mécaniques des matériaux, notamment en ce qui concerne les câbles,

tout en prenant en compte l'influence de certains facteurs tels que la corrosion ;

- de la recherche de méthodes simplifiées, mais permettant de mieux cerner la sécurité en tenant compte d'un fonctionnement anormal éventuel de l'ouvrage et du choix des coefficients de sécurité corrélatifs : par exemple, prise en compte d'un dérèglement de suspension susceptible de modifier notablement les efforts dans les pièces essentielles de l'ouvrage (suspentes notamment).

Les règles qui suivent tentent d'apporter une réponse à ces questions et s'appliquent au cas le plus courant de ponts suspendus qui comportent une véritable poutre de rigidité. Pour les ouvrages qui en sont dépourvus, le calcul du tablier et des suspentes fait appel à des méthodes particulières qui dépen-



dent de la conception de détail de la structure et peuvent s'inspirer en général de la note de calcul d'origine.

II-2.1 - Principes généraux

II-2.1.1 - Méthodes de calcul

Seul est considéré ici le calcul des ouvrages sous l'action des charges verticales. Il conviendra de s'assurer par ailleurs que le tablier transmet correctement aux appareils d'appuis les efforts horizontaux dus au vent.

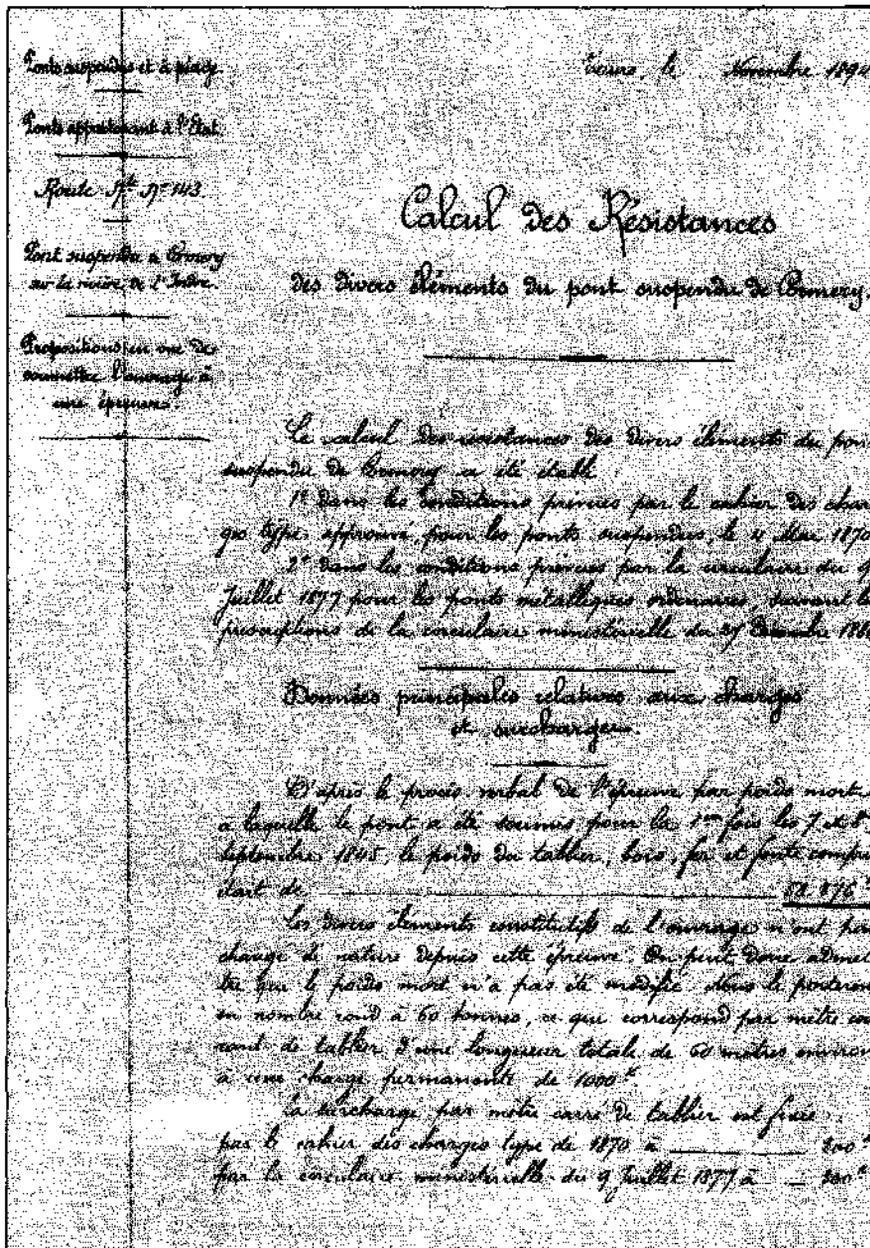
Il existe actuellement deux méthodes principales de calcul.

a) Les méthodes de calcul informatique basées sur des programmes de barres. Ces programmes, utilisés couramment par ailleurs pour le calcul des structures, sont généralement au premier ordre. Dans le cas des ponts suspendus qui sont des structures déformables et où les câbles sont tendus en l'absence des surcharges par le poids propre du tablier, les programmes au premier ordre donnent des résultats sensiblement inexacts.

Dans le cas d'utilisation de programmes au deuxième ordre, la principale difficulté réside dans la bonne schématisation de l'état initial : à la température de réglage et en l'absence de surcharges, mais sous l'action des charges permanentes, les poutres de rigidité ne supportent théoriquement aucun effort.

b) Les méthodes de calcul "manuelles" au deuxième ordre basées sur les formules de résistance des matériaux : une méthode complète est exposée dans le cours de Courbon, où la plupart des types de ponts suspendus ont été étudiés. Les calculs sont facilités par l'emploi d'abaques ou de mini programmes. Pour les cas les plus courants, ils ont été entièrement programmés dans différents CETE, au SETRA, et par certaines entreprises. Cette méthode est basée sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- les suspentes sont inextensibles et infiniment rapprochées ;
- les câbles n'exercent aucune réaction horizontale sur les pylônes (pylônes articulés ou flexibles, ou selles mobiles) ;



- les déformations dues à l'effort tranchant sont négligées ;

- les suspentes demeurent verticales ;

- on considère une inertie moyenne constante de la poutre de rigidité.

Ces hypothèses sont très généralement justifiées (cf. annexe 1 : [1], [2]), elles conduisent à des erreurs négligeables, ou faibles et défavorables (verticalité des suspentes).

Bien entendu, les deux méthodes supposent :

- un réglage correct de la suspension (solicitations nulles dans les poutres de rigidité sous charge permanente),

- le bon état des chariots des selles, lorsque celles-ci sont mobiles (frottements faibles).

II-2.1.2 - Comparaison des méthodes de calcul

Un test a été fait à partir d'un ouvrage réel (pont de Remoulins, Gard) et avec trois méthodes :

- programme de barres au premier ordre SP2D du LCPC,

- programme de barres au deuxième ordre SP2D GD du LCPC,

- méthode de Courbon.

La courbe (fig. II-7) donnant le moment M dans une section déterminée quelconque du tablier, en

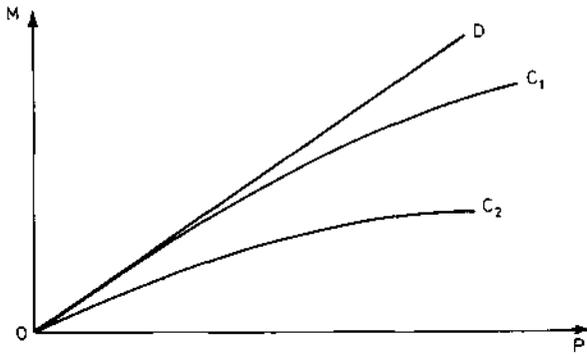


Fig. II-7

– une courbe *C* dans le cas du calcul au deuxième ordre ; le principe de superposition des effets n'est plus alors applicable.

Si la charge permanente était nulle ($g \approx 0$) la courbe (C_1) serait tangente à la droite *D* et les moments dans le tablier obtenus par les méthodes au premier et au deuxième ordre seraient voisins (fig. II-8).

En réalité, du fait des charges permanentes, la courbe (C_2) et la droite *D* ne sont pas tangentes et les résultats diffèrent notablement : la prise en compte du deuxième ordre conduit à des sollicitations sensiblement inférieures (fig. II-9).

A noter la très bonne concordance des valeurs obtenues à partir du programme SP2D GD, d'une part, et par la méthode de Courbon d'autre part.

II-2.1.3 - Suspension

Les efforts dans les éléments de la suspension peuvent en fait être calculés avec une bonne précision très simplement (comme indiqué aux § 2.2, 2.3 et 2.4 du présent chapitre) sans avoir recours aux méthodes élaborées évoquées ci-dessus qui ne sont indispensables que pour la vérification des poutres de rigidité.

• Câbles paraboliques et câbles de retenue

On constate, en général, que ces câbles ont été calculés à partir de charges générales d'exploitation voisines de la charge actuelle *A* (*I*), et qu'ils sont donc suffisants lorsqu'ils sont en bon état.

• Haubans et suspentes

Les tiges ou câbles de suspension (suspentes) et les câbles obliques de rigidité (haubans) sont des organes très importants pour la sécurité. Leur calcul dépend de la conception du tablier d'une part, et de la possibilité d'un dérèglement de la suspension d'autre part. Ces câbles ou ces ronds ont en général été dimensionnés avec une sécurité assez large, mais à partir de charges locales inférieures à celles d'aujourd'hui.

Si on place une charge (surcharge B_c ou *A* (*I*)) sur une partie seulement de la poutre de rigidité d'une travée indépendante suspendue, on constate que les suspentes créent une densité de charge négative sur toute la longueur de celle-ci (fig. II-10 a et b). Les charges extérieures sont assez bien réparties entre toutes les suspentes de la travée ; cela explique la présence de moments négatifs dans les poutres de rigidité (fig. II-11 a et b).

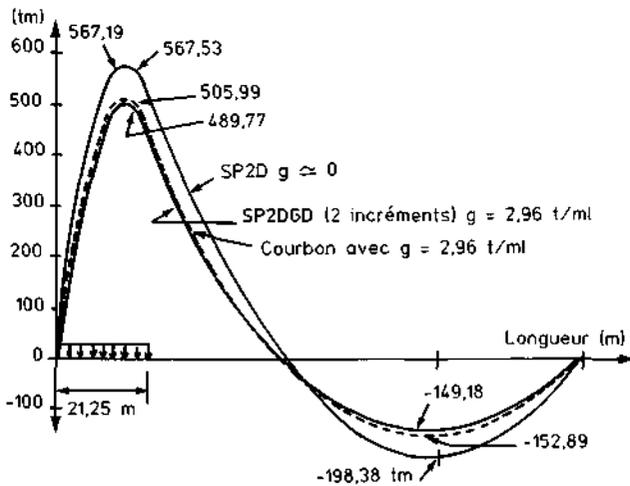
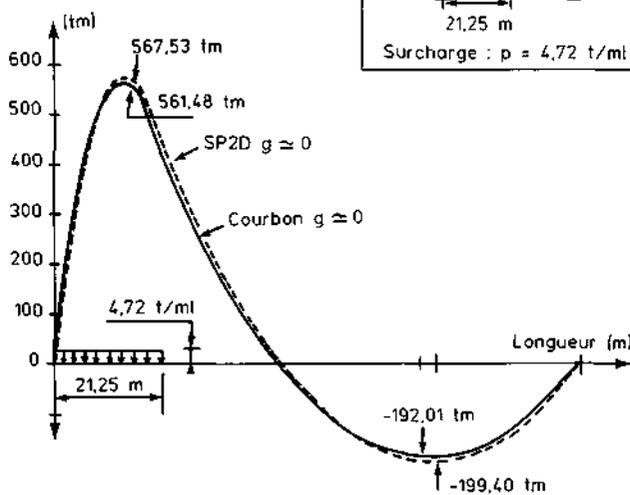


Fig. II-8 et II-9 Exemples.
Pont de Rémoulins (Gard).

fonction de l'intensité de la charge *P* appliquée en un point donné est :

– une droite *D* dans le cas du calcul au premier ordre ;

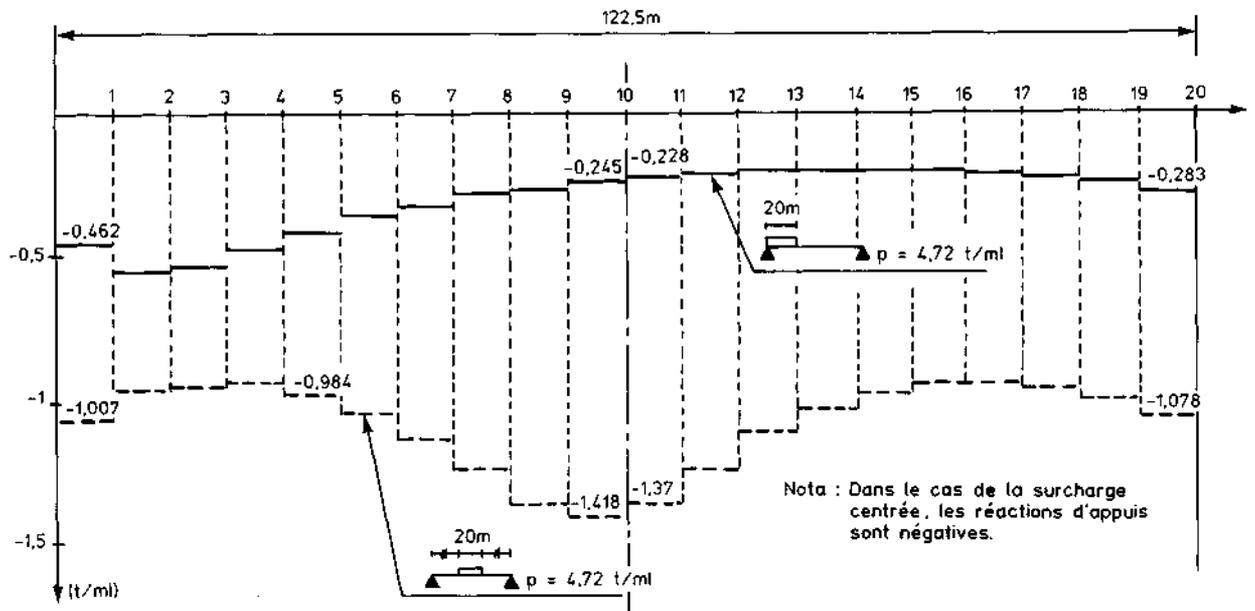


Fig. II -10a- Charge répartie supportée par les suspentes sous surcharge B_c .

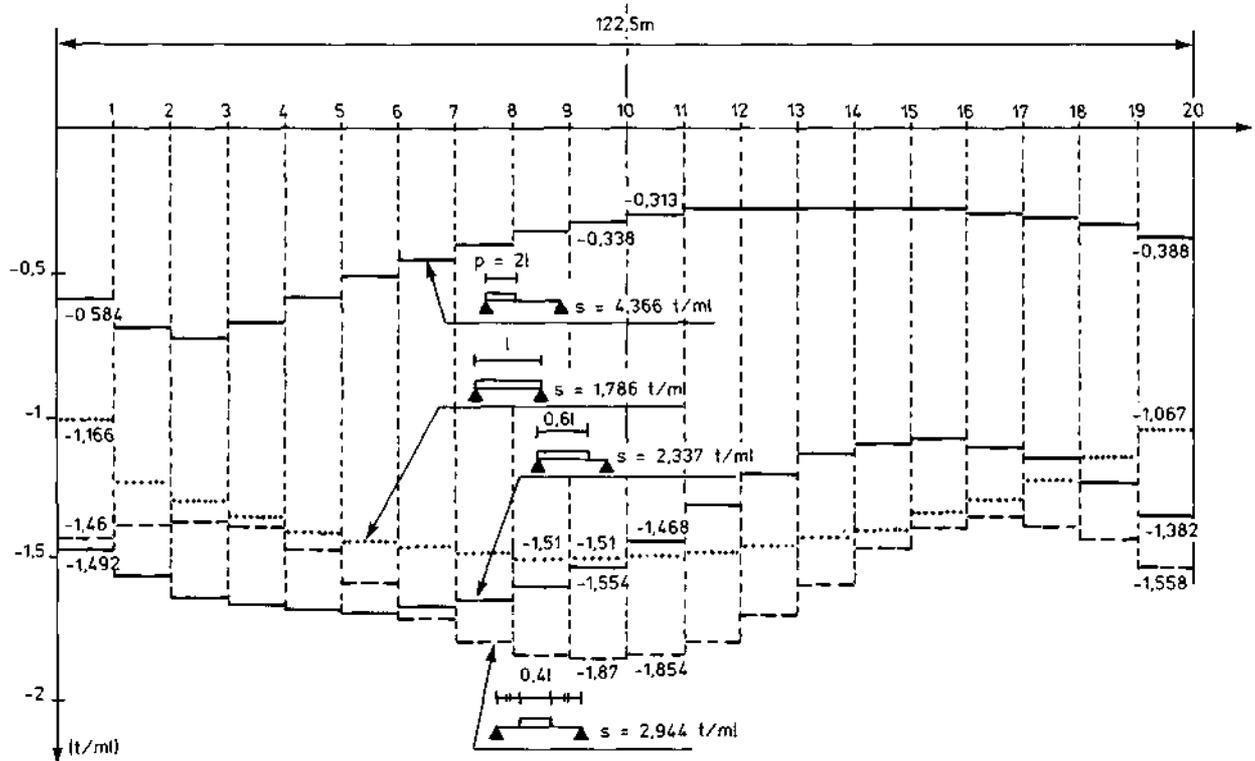


Fig. II -10b- Charge répartie supportée par les suspentes sous surcharge $A(I)$.

II-2.1.4 - Tablier

On admet le schéma de fonctionnement suivant :

- les charges sont transmises par l'intermédiaire des longerons aux pièces de pont. Si la continuité des longerons est assurée de manière correcte, une charge concentrée peut être répartie sur plus de deux pièces de pont ;
- les pièces de pont transmettent les charges aux suspentes et aux poutres de rigidité. Ces dernières

exercent un rôle répartiteur des efforts entre les suspentes et permettent de limiter la déformation du tablier; elles améliorent la sécurité (traction moindre dans les suspentes), le confort des usagers et la durabilité de l'ouvrage (déformabilité moindre de la structure) ;

- de plus, les poutres de rigidité jouent le rôle de membrures de la poutre à plan moyen horizontal que constitue le tablier lorsqu'il est soumis à l'action du vent.

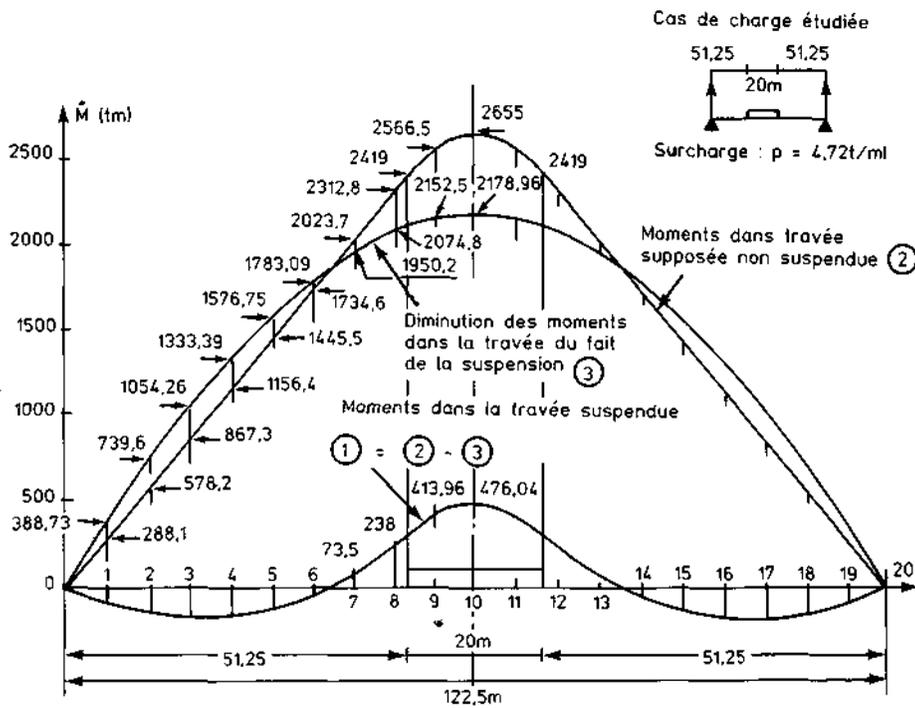


Fig. II -11a

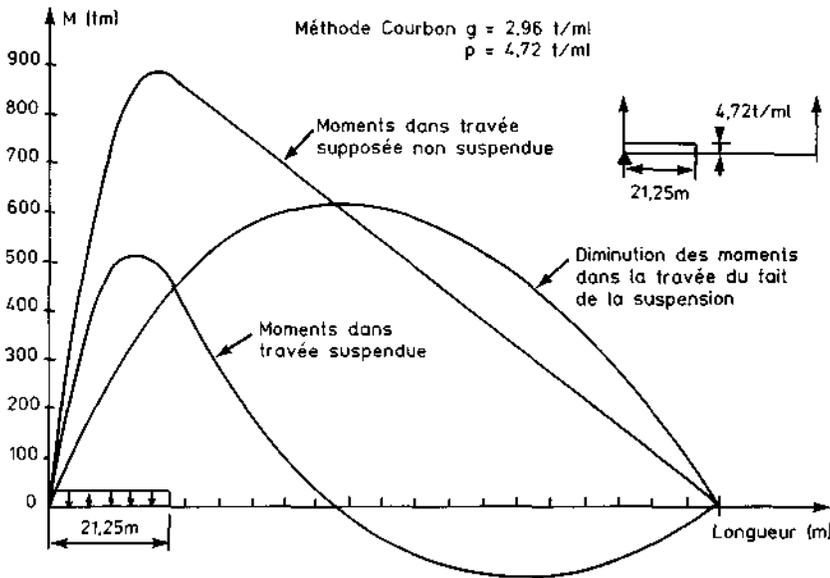


Fig. II -11b

Le rôle porteur principal étant assuré par la suspension, on estime souvent qu'il est admissible de ne pas exiger des poutres de rigidité la même réserve de sécurité que celle qui est demandée aux poutres principales d'un ouvrage non suspendu. Certains incidents survenus sur des ponts suspendus ont effectivement montré que la défaillance des poutres de rigidité, sous l'effet d'une surcharge accidentelle, pouvait ne pas entraîner la ruine totale de l'ouvrage : il importe cependant de noter que le schéma de fonctionnement "direct" qui s'instaure alors : "charge - longerons - pièces de pont - suspentes" suppose que ces pièces, les suspentes notamment, présentent le surcroît de résistance nécessaire : on ne peut à la fois sous-estimer l'importance des poutres de rigidité et tenir intégralement compte

de son rôle favorable dans le comportement de la structure.

Les poutres de rigidité constituent un point faible de beaucoup d'ouvrages anciens, qui ont fait en conséquence l'objet d'une limitation de la charge roulante : il est alors prudent d'apprécier dans quelle mesure le schéma "direct" permettrait de faire face, si besoin était, à un dépassement occasionnel de la charge autorisée (cf. § II-2.4b).

II-2.1.5 - Réglementation

Au XIX^e siècle ont été élaborés des règlements spécifiques aux ponts suspendus (voir notamment les modèles de cahier des charges du 23 août 1852 et du 7 mai 1870). Ces documents permettent de

mieux comprendre la conception des ouvrages anciens et sont encore utiles aujourd'hui.

Depuis lors, la technique des ponts suspendus a évolué et la réglementation n'a que très imparfaitement suivi : seules quelques prescriptions succinctes relatives aux câbles et aux suspentes peuvent être trouvées dans certains textes concernant les ponts métalliques dans leur ensemble.

Aussi est-ce :

- en tirant parti des errements du passé, qui ressortent des notes de calcul des ponts réalisés,
- en tenant compte des acquis de l'expérience, que concrétisent les incidents sur ouvrages,
- en s'appuyant sur nos connaissances actuelles, que traduisent nos règlements de construction métallique,

qu'ont été choisis les modes et formules de vérification qui sont proposés dans le présent chapitre.

Comme cela a toujours été l'usage, la vérification de la suspension est envisagée en état limite de service. Cette manière de procéder ne soulève pas de question de principe, dans la mesure où les sollicitations croissent pratiquement comme les actions (très légèrement moins vite - cf. § II-2.1).

Pour les poutres de rigidité, il est proposé de se référer aux règles établies pour l'état limite ultime par l'actuel règlement de ponts métalliques (titre V du fascicule 61 du CCTG*), dans les conditions précisées au § II-5.2 : il conviendra alors de multiplier par le facteur 4/3 les sollicitations calculées en état limite de service. Dans ce cas aussi, les sollicitations croissent un peu moins vite que les actions et ce procédé de calcul place du côté de la sécurité. En revanche, il suppose que les sollicitations dans la poutre de rigidité demeurent nulles sous la charge permanente : si celle-ci venait à être modifiée, pour une cause ou une autre, un réglage en conséquence de la suspension serait nécessaire.

Les modes et formules de vérification indiqués dans le présent chapitre n'ont pas, rappelons-le, de caractère réglementaire : ils ont pour but de donner des points de repère aux ingénieurs, qui auront à garder leur part d'appréciation. Il s'agit en effet d'ouvrages anciens, qui représentent en général un capital important, et pour lesquels la recherche d'un niveau de sécurité ou de confort identique à celui que l'on exige d'un ouvrage neuf pourrait, dans certains cas, entraîner des dépenses ou des restrictions de circulation disproportionnées.

* Cahier des clauses techniques générales.

Dans la suite du texte, la notation q désigne la charge d'exploitation par mètre linéaire de tablier. Lorsque le pont est ouvert librement à la circulation des véhicules respectant les normes du code de la route et aux convois exceptionnels de première et deuxième catégories, q est la charge du type A donnée par le titre II du fascicule 61 du CCTG multipliée par le coefficient 1,2. Dans le cas contraire, des valeurs appropriées de q sont à définir en fonction des limitations de charges imposées sur l'ouvrage.

II-2.2 - Calcul des câbles

II-2.2.1 - Calcul des efforts

Le cas de charge le plus défavorable est obtenu en chargeant tout l'ouvrage.

Soit :

g , charge permanente par mètre linéaire,
 q , charge d'exploitation par mètre linéaire.

On obtient une très bonne approximation en écrivant :

$$H = (g + q) \frac{l^2}{8f} \quad (1)$$

H , poussée = composante horizontale de la tension dans le câble,

f , flèche initiale du câble.

la tension maximale dans le câble vaut :

$$T = \frac{H}{\cos \theta} \quad (\text{fig. II-12}).$$

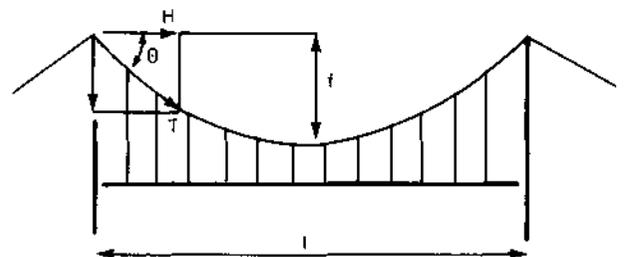


Fig. II-12

Dans la formule (1) on a négligé l'influence de la rigidité du tablier et la correction du deuxième ordre (la valeur de f à prendre en compte devrait être la flèche du câble après chargement), qui sont favorables, et l'effet de la température minimale qui est défavorable. Ces deux effets sont faibles et se compensent en partie.

Si l'on effectue un calcul plus précis par une méthode au deuxième ordre, on pourra prendre en

compte une variation de la température correspondant à un raccourcissement relatif des câbles de $3 \cdot 10^{-4}$.

II-2.2.2 - Vérification

On vérifie que la tension maximale de calcul des câbles est inférieure à 0,42 fois la résistance de ces derniers :

$$T < 0,42 R.$$

Il convient bien entendu de s'assurer par ailleurs que la suspension de l'ouvrage est correctement réglée et que la tension est également répartie entre les câbles d'une même nappe ou d'un même faisceau.

II-2.2.3 - Résistance

On peut admettre que la résistance d'un câble est donnée par la formule dite "des câbleurs" :

$$R = \sum F_{ri} n_i \cos \alpha_i$$

où :

n_i = nombre de fils de la couche i ,
 α_i = angle de toronnage des fils de la couche i ,
 F_{ri} = résistance des fils de la couche i .

Dans le cas de câbles anciens, ces valeurs doivent être appréciées avec circonspection, en recherchant le maximum d'informations :

- valeurs figurant dans le projet d'exécution,
- mesures effectuées lors de la construction,
- essais effectués spécialement dans ce but, par exemple sur des fils rompus,
- informations disponibles sur des câbles de type et d'âge voisins.

II-2.3 - Câbles obliques de rigidité (haubans)

Les câbles obliques permettent d'augmenter la rigidité de l'ouvrage lorsque le tablier ne comporte pas de véritables poutres de rigidité, en diminuant la partie suspendue aux câbles paraboliques. Les efforts de traction développés entre les deux nappes de haubans peuvent être repris par des câbles horizontaux situés au niveau de la poutre de rigidité.

En première analyse (fig. II-13) :

- la partie centrale est traitée comme une travée suspendue de longueur l de flèche f ;

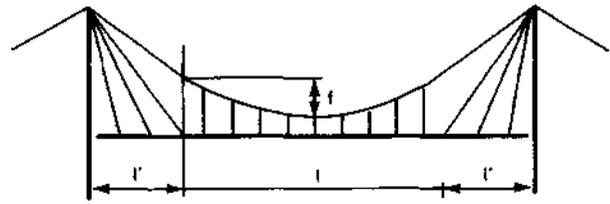


Fig. II-13

- les parties latérales de longueur l' peuvent être calculées en supposant que la poutre de rigidité présente une articulation au droit de chaque attache de haubans ;

- la vérification de la sécurité des câbles obliques est identique à celle des câbles paraboliques.

Un calcul plus précis peut être effectué à l'aide d'un programme de barres au deuxième ordre.

II-2.4 - Suspentes

a) Quand la poutre de rigidité joue pleinement son rôle :

La méthode de Courbon permet de calculer la densité \bar{w} de charge qu'elle supporte (fig. II-10). Par différence avec la charge appliquée q on obtient la densité de charge supportée par les suspentes sous l'action des charges d'exploitation : $q - \bar{w}$. Soit d l'espacement des suspentes, l'effort total dans une suspente vaut :

$$d(g + q - \bar{w})$$

La contrainte correspondante doit rester inférieure à $\sigma_r / 5$ pour tenir compte du fait que des suspentes peuvent être dérégées (σ_r = contrainte de rupture de la suspente en rond ou en câble).

Les suspentes étant toujours tendues, quels que soient la suspente et le point d'application de la charge, il est loisible de mener la vérification en considérant la travée chargée sur toute sa longueur, et en adoptant comme valeur de calcul de la traction dans les suspentes une valeur unique égale à la valeur maximale obtenue pour ce cas de charge (suspente centrale). Un bon ordre de grandeur de cette valeur est obtenu en divisant par le nombre total des suspentes la somme de la charge permanente du tablier et de la charge d'exploitation.

b) Si la liaison entre la suspente et la poutre de rigidité peut présenter un certain jeu (cas qui peut se produire, par exemple, lorsque la suspente est attachée à une pièce de pont qui est simplement boulonnée sur la poutre de rigidité) ou si la poutre

de rigidité est très déformable (ou risque de l'être en cas de surcharge accidentelle (§ II-2.1.4), on suppose la présence d'articulations dans la poutre de rigidité au droit de chaque suspente (travée isostatique entre deux suspentes voisines). La contrainte calculée à partir de la charge permanente et de la charge d'exploitation du type *B* multipliée par le facteur 1,2 est comparée à $\sigma_r / 3$.

II-2.5 - Poutres de rigidité

II-2.5.1 - Calcul des sollicitations

Les sollicitations sont calculées à partir d'une combinaison d'actions faisant intervenir :

- la charge permanente ;
- les charges d'exploitation ; ces charges seront supposées appliquées directement aux poutres de rigidité, sans qu'il soit nécessaire de tenir compte de leur répartition par l'intermédiaire des pièces de pont ;

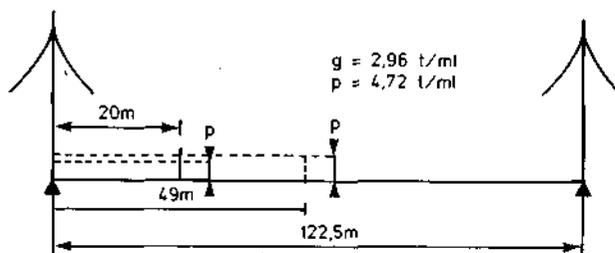
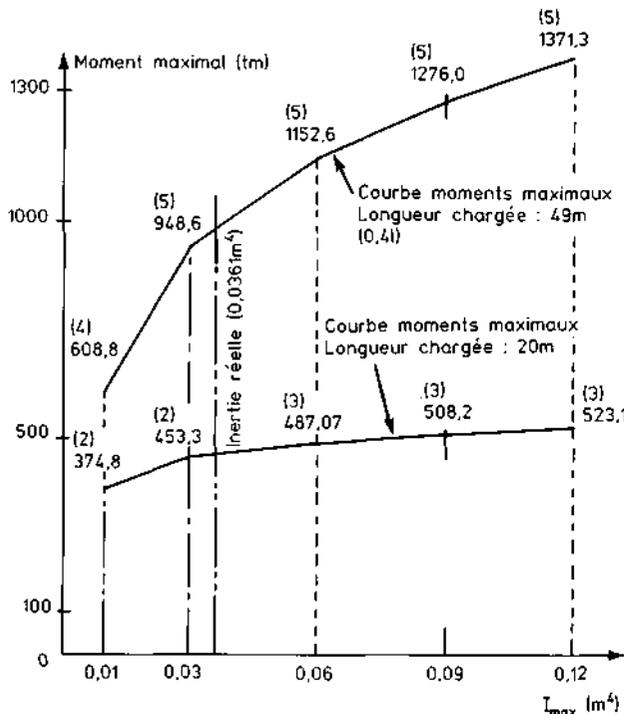


Fig. II -14- Pont de Rémoulins (Gard). Courbe de variation du moment maximal en fonction de l'inertie.

- la température ; la dilatation linéaire relative correspondant à la variation de la température par rapport à la température de réglage pourra être prise égale à $\pm 3 \cdot 10^{-4}$.

Il est rappelé que le réglage de la suspension est supposé conduire à des sollicitations nulles sous l'action de la seule charge permanente (cf. § II-2.1.1).

Les sollicitations sont fonction croissante de la rigidité EI de la poutre qu'il convient donc de ne pas sous-estimer (fig. II-14), notamment en ce qui concerne la vérification au déversement :

a) en première analyse, on peut se placer en sécurité avec les valeurs suivantes :

- $E = 20\ 000\ kg/mm^2$ (dans certaines notes de calculs d'ouvrages, le module est pris égal à des valeurs inférieures dans le cas de poutres triangulées pour tenir compte du fait que les déformations d'effort tranchant sont négligées (cf. § II-2.1.1b)) ;

- I = inertie complète moyenne de la poutre (compte tenu éventuellement de la dalle et des longerons).

Les cas de charge à envisager sont approximativement ceux donnés dans la figure II-15.

b) Dans le cas d'utilisation d'un programme informatique, il est possible de calculer les sollicitations dans chaque section, en considérant un grand nombre de cas de charge (fig. II-16 et II-17).

II-2.5.2 - Vérifications

Les vérifications de résistance et de stabilité des poutres de rigidité sont effectuées avec le règlement actuel de calcul des ponts métalliques (fasc. 61 titre V) ; comme il s'agit de vérifications à l'état limite ultime, les contraintes sont calculées à partir des sollicitations définies au § II-2.5.1 multipliées par le facteur 4/3.

Comme on l'a vu au paragraphe II-1.4, et avec les réserves qui ont été exprimées, un certain dépassement des sollicitations qui satisferaient strictement au règlement peut être envisagé.

A titre d'exemple, précisons que pour les poutres de rigidité des grands ponts suspendus calculés au Service Central d'Études Techniques après la dernière guerre, les contraintes admissibles étaient relevées d'environ 15 % par rapport à la valeur réglementaire applicable aux poutres principales des ouvrages non suspendus ($15\ kg/mm^2$ au lieu de 13).

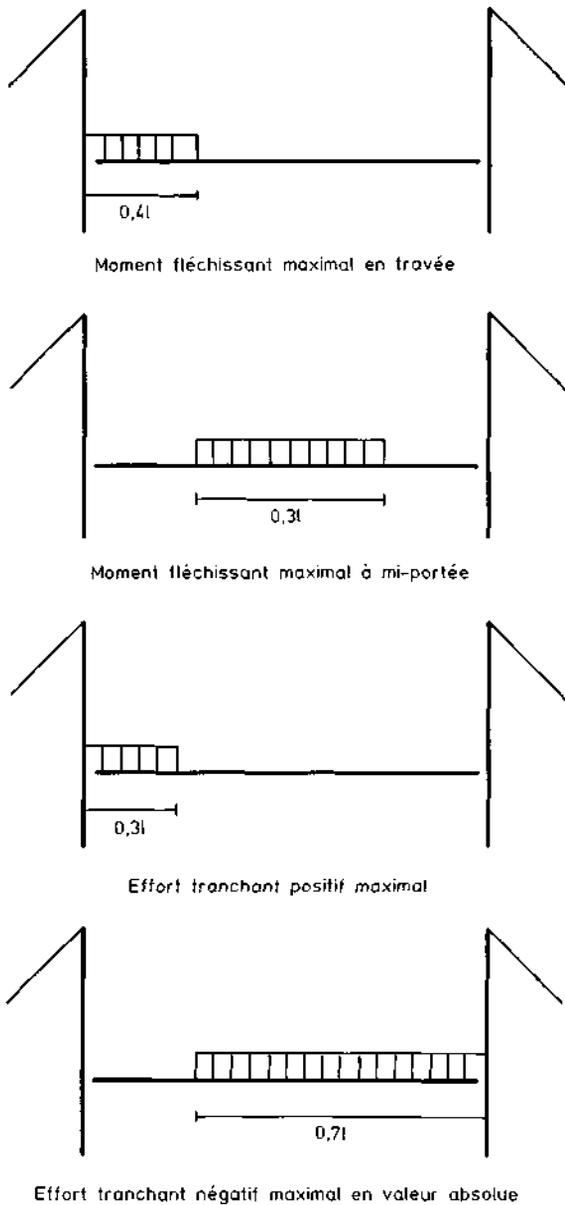


Fig. II-15

Les sections ne peuvent être considérées comme mixtes que dans le cas d'une bonne connexion de la dalle aux poutres principales.

Il convient de prêter une attention particulière à la stabilité des membrures comprimées. L'élanement b/t souvent important des tôles qui les constituent rend ces dernières sensibles au voilement local et la vérification de non-déversement de la poutre doit en tenir compte, en considérant par exemple une largeur b' réduite ($< b$). Par ailleurs, la valeur du rappel élastique exercé par les cadres ouverts constitués par les pièces de pont et les montants de la poutre doit être appréciée en tenant compte du mode d'assemblage de ces pièces, qui assure un encastrement plus ou moins bon des montants sur les pièces de pont (fig. II-18).

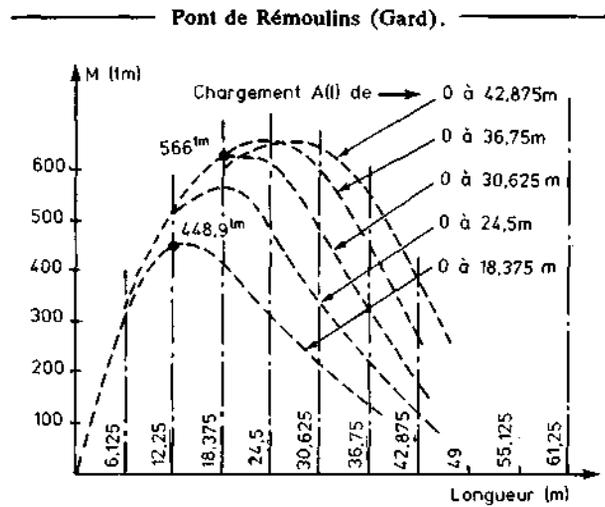
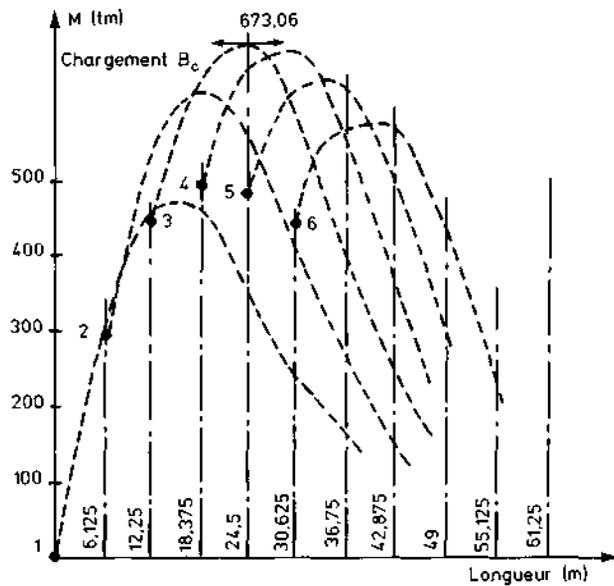


Fig. II-16



- 1 4,72 t/ml entre 0 et 20m
- 2 4,72 t/ml 6,125 et 26,125m
- 3 4,72 t/ml 12,25 et 32,25m
- 4 4,72 t/ml 18,375 et 38,375m
- 5 4,72 t/ml 34,5 et 44,5m
- 6 4,72 t/ml 30,625 et 50,625m

Fig. II-17

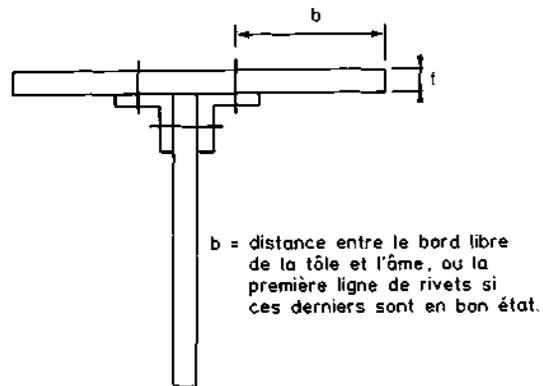


Fig. II-18

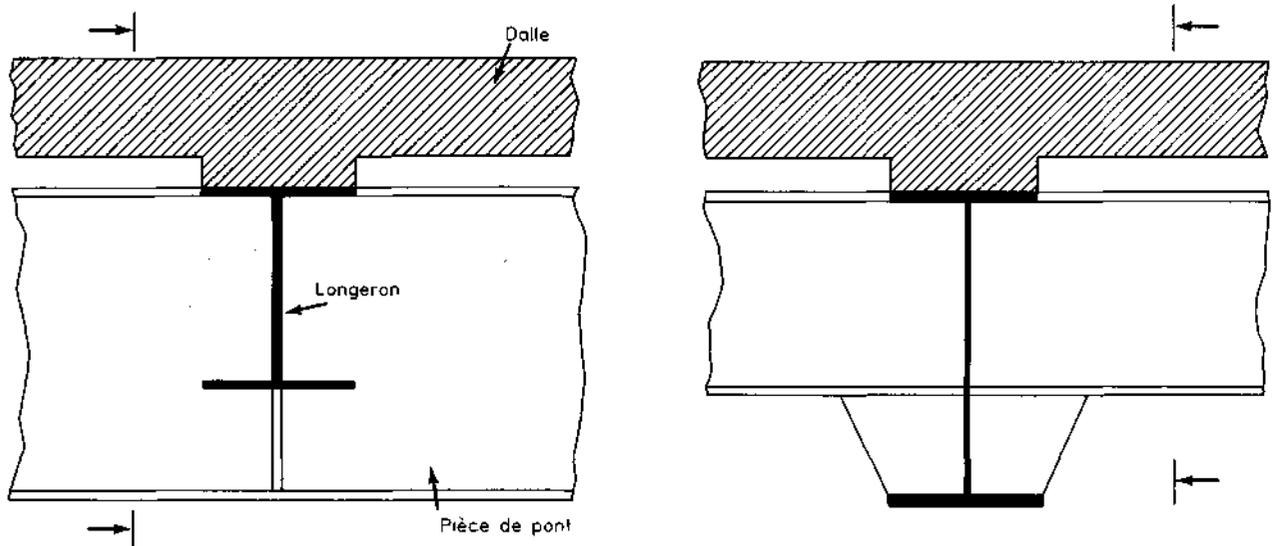


Fig. II-19

II-2.6 - Pièces de pont - Longérons et longrines

II-2.6.1 - Calcul simplifié des sollicitations

a) Pièces de pont

Les charges sont réparties longitudinalement entre les différentes pièces de pont en supposant que le tablier est articulé au droit de chacune d'elles.

Transversalement, chaque pièce de pont est supposée simplement appuyée au droit des suspentes (fig. II-19).

b) Longérons

Les charges sont réparties transversalement entre les longérons en supposant que la dalle est articulée au droit de ceux-ci.

Longitudinalement, les longérons sont supposés simplement appuyés sur les pièces de pont.

Dans le cas où la continuité des longérons est assurée (les assemblages ne doivent pas avoir de jeu), on peut en tenir compte en réduisant de 20 % le moment maximal dans le longeron.

II-2.6.2 - Calcul plus précis des sollicitations

a) Pour mieux prendre en compte la continuité des longérons, il est possible de faire un calcul de poutraison croisée sur quelques pièces de pont avec un formulaire de résistance des matériaux (RdM) ou un programme de barres (fig. II-20). Il est à noter que le nombre d'essieux à considérer est alors en général plus élevé que pour le calcul simplifié.

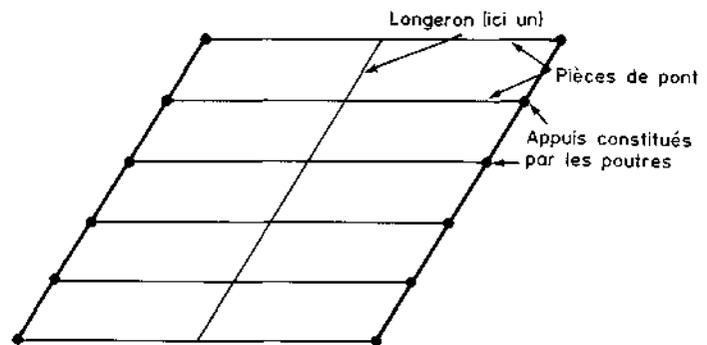


Fig. II-20

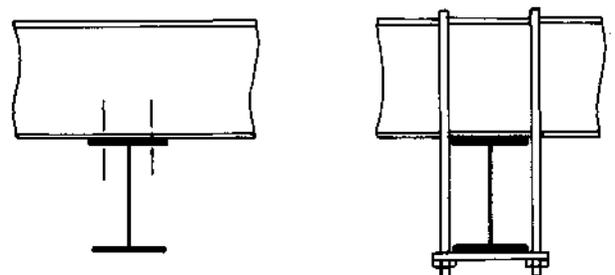


Fig. II-21

On admet que les poutres de rigidité ne se déforment pas (on néglige le rôle éventuel des longérons en tant que poutres de rigidité).

b) Dans certains cas, les pièces de pont étant devenues insuffisantes, on a disposé des éléments appelés improprement "sous-longrines" sous les pièces de ponts (fig. II-21).

Les sous-longrines sont continues. La fixation à la pièce de pont par l'intermédiaire de boulons ou d'étriers constitue généralement le point faible de ce système. Les sous-longrines ne peuvent jouer un rôle répartiteur que si cette fixation est parfaitement assurée.

Le calcul des sollicitations peut être fait par la méthode exposée en a).

II-2.6.3 - Vérifications

Les vérifications sont effectuées à l'état limite ultime avec le règlement actuel de calcul des ponts métalliques (fascicule 61, titre V du CCTG).

Dans le cas où le calcul conduit à des contraintes voisines de la limite d'élasticité qu'il paraît raisonnable d'admettre pour le métal constitutif des pièces, il peut être intéressant de chercher à déterminer expérimentalement les contraintes qui se développent dans les pièces de pont et les longerons sous l'action des charges d'exploitation, en mesurant leurs déformations au moyen de jauges extensométriques.

En effet, le calcul est entaché de nombreuses approximations, notamment :

- la continuité des longerons est plus ou moins effective ;
- les réductions éventuelles de section dues à la corrosion sont difficilement appréciables et très irrégulières ;
- la dalle en béton armé de la couverture joue dans une certaine mesure un rôle de répartition longitudinale des charges qui soulage d'autant les longerons, mais qu'il est difficile d'appréhender par le calcul ;
- le coefficient de majoration dynamique à prendre en compte est particulièrement mal connu lorsqu'il s'agit d'ouvrages anciens.

Cependant, la détermination expérimentale des contraintes est une opération relativement coûteuse, qui demande beaucoup de soins et présente certaines sujétions. Il est indispensable que les informations données par les tests réalisés sur un nombre aussi limité que possible d'éléments soient exploitables au bénéfice de l'ensemble de l'ouvrage et, pour cela, une interprétation correcte des essais doit permettre de préciser chacun des paramètres nécessaires au calcul, paramètres qui, on vient de le voir, sont assez nombreux et dont les effets se superposent ; aussi conçoit-on que le choix des pièces et des sections de ces pièces à "instrumenter" demande au préalable une étude approfondie. Il est également très souhaitable de s'appuyer sur les expériences passées, dans un domaine où, de plus, les hypothèses classiques de la résistance des matériaux risquent de ne pas toujours être vérifiées (par exemple, déformations non linéaires dans une section proche d'un assemblage).

Par ailleurs, les résultats obtenus ne peuvent être extrapolés sans précaution à des charges supérieures aux charges d'essai : le fonctionnement en structure mixte, par exemple, d'une pièce de pont et de la dalle de couverture, solidarisées par adhérence et par la butée que constituent les têtes de rivets, est souvent observé, mais du fait du caractère fortuit et incertain de la connexion, ne peut être pris en compte en dehors des conditions de l'expérience.

Il convient de noter, enfin, que les résultats des expérimentations déjà effectuées sur certains ouvrages constituent d'intéressants précédents, susceptibles de donner d'utiles indications sur le comportement des structures analogues que l'on aurait à examiner.

II-2.7 - Pylônes

Les vérifications concernant la stabilité et la résistance des pylônes dépendent :

- de la nature du matériau constitutif : maçonnerie, béton armé, métal ;
- du mode de fonctionnement des pylônes dans la structure : pylônes encastrés rigides, encastrés flexibles, articulés (cf. chapitre IV-3).

Les actions à prendre en compte dans les cas courants sont indiquées ci-dessous.

II-2.7.1 - Pylônes encastrés rigides (fig. II-22)

- a) Le poids propre du pylône.
- b) La composante verticale N des tensions des câbles aboutissant à la tête du pylône ; N est excentré du déplacement de la selle mobile dû aux charges d'exploitation et à la température. On tiendra compte en plus, le cas échéant, d'un défaut de centrage initial "e".

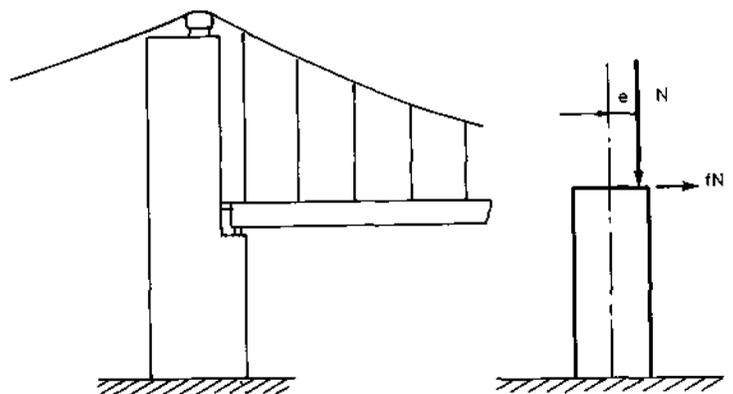


Fig. II-22

c) Une force horizontale longitudinale en tête de pylône correspondant au frottement de la selle mobile $= f.N$.

La valeur du coefficient de frottement f peut être appréciée en observant, pour des convois routiers d'importances diverses, le fonctionnement de l'ensemble selle-pylône :

- valeur du déplacement absolu de la selle ;
- valeur du déplacement relatif de la selle par rapport à la tête du pylône ;
- déformation du pylône.

Lorsque le coefficient de frottement est élevé (blocage des chariots) on doit calculer le pylône comme s'il était encastré flexible (il conviendra alors bien souvent de changer les rouleaux et de s'assurer que les pylônes n'ont pas souffert (cf. § IV-3.1).

d) Le vent.

II-2.7.2 - Pylônes encastrés flexibles (fig. II-23)

- a) Le poids propre du pylône.
- b) La composante verticale N des tensions des câbles aboutissant à la tête du pylône.

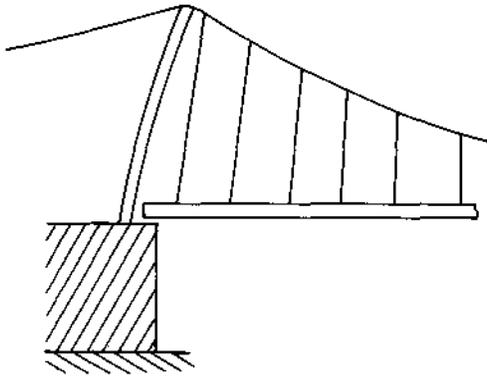


Fig. II-24

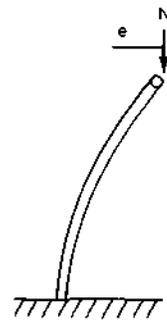
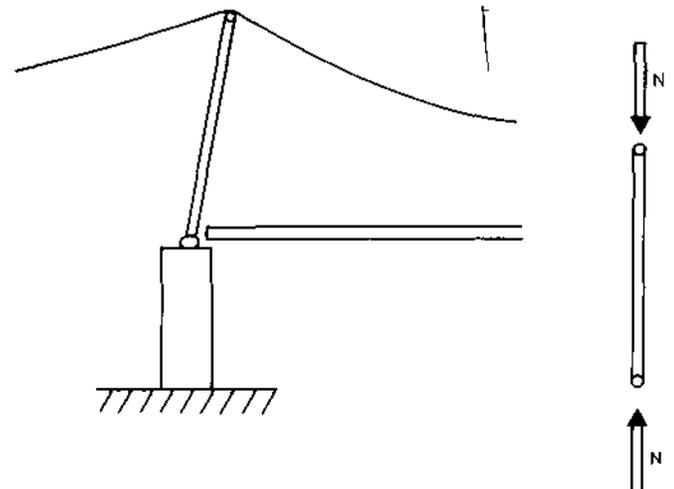


Fig. II-23



c) Le déplacement horizontal longitudinal e de la tête du pylône. En première analyse, e peut être calculé comme si le pylône était infiniment flexible (un calcul plus précis de e faisant intervenir la rigidité des câbles et du pylône peut être fait). Par ailleurs, il peut être tenu compte, le cas échéant, d'un défaut de rectitude du pylône sous charge permanente.

Pour le calcul de stabilité (plan de flambement : plan des fermes) le pylône est considéré comme articulé en tête.

II-2.7.3 - Pylônes articulés (fig. II-24)

Ces pylônes sont soumis principalement à une force centrée (composante verticale de la tension des câbles aboutissant à la selle).

Ils sont vérifiés au flambement en les considérant comme biarticulés.

II-2.7.4 - Remarques

- a) Dans le cas où le niveau du tablier se situe entre le sommet et la base du pylône, il convient de tenir compte des efforts qu'il introduit dans les vérifications précédentes (fig. II-25).

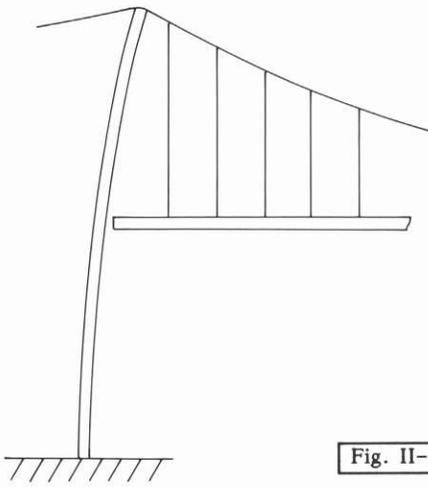
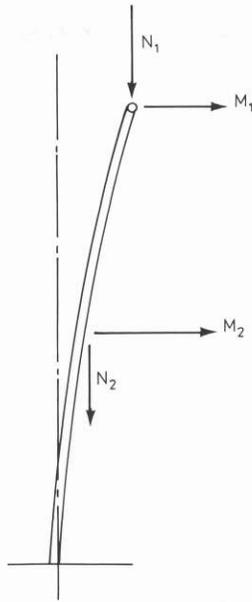


Fig. II-25



b) Conformément aux prescriptions de l'article 14.1 du titre II du fascicule 61 du CCTG, les effets du vent et des charges d'exploitation ne sont pas susceptibles de se cumuler.

Les variations de température par rapport à la température de réglage pourront être prises égales à celles indiquées ci-avant aux § II-2.2.1 et II-2.5.1 (dilatation linéaire relative de $\pm 3 \cdot 10^{-4}$).

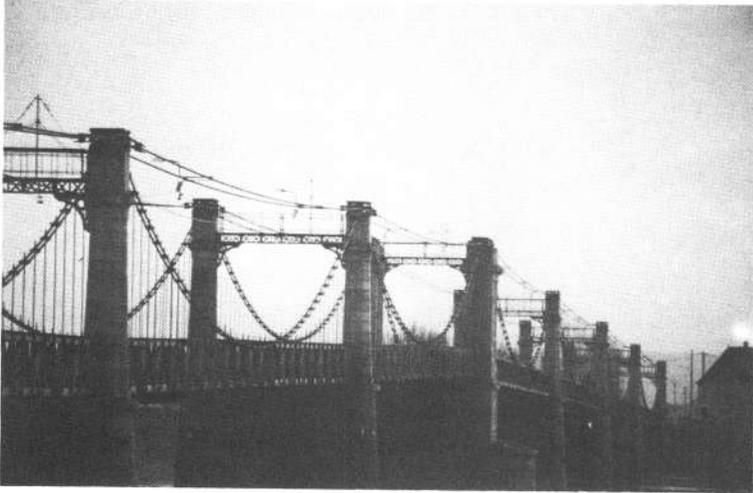
c) Des chargements excentrés du tablier seront à considérer dans certains cas, notamment pour la vérification des traverses des pylônes constitués de portiques.



Pont de Lancey (Isère).



Pont de Floirac (Gironde).



Pont d'Ingrandes (Maine-et-Loire).



Pont de Trévoux (Ain).



Pont de Varades (Loire-Atlantique).

CHAPITRE III

SUSPENSION

III-1 - INTRODUCTION

La suspension est composée principalement :

- de câbles dont les éléments primaires sont des fils dont le diamètre est généralement compris entre 4 et 5 mm ; ces câbles peuvent être de différents types : à fils parallèles, torsadés, monotorons (clos ou non) ;

- de suspentes de liaison entre les câbles et le tablier ; ces suspentes peuvent être constituées soit de barres, soit de petits câbles dont les fils élémentaires ont un diamètre de l'ordre de 4 à 5 mm pour les suspentes à brin unique, et de 2,5 mm pour les suspentes à deux brins qui passent au-dessus des colliers.

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

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

Ainsi, les aciers à haute résistance se détériorent-ils à la fois par corrosion accompagnée d'enrouillement (corrosion par dissolution) et par corrosion fissurante sous tension. Ces deux types de corrosion apparaissent lorsque l'eau atteint les aciers, soit après condensation, soit par ruissellement ; c'est pourquoi l'arrivée d'eau à l'intérieur des câbles est un problème que l'on a tenté de résoudre, en utilisant par exemple des fils périphériques profilés (câbles clos), et en prenant des dispositions constructives pour éviter la stagnation de l'eau. Comme l'efficacité de ces mesures ne peut être garantie totalement, une protection de chaque fil élémentaire des câbles a été envisagée et réalisée, par exemple, par galvanisation à chaud.

III-2 - ACIERS UTILISÉS MODE D'ÉLABORATION DES FILS

III-2.1 - Les fils ronds

Les aciers des fils des câbles les plus anciens avaient une faible teneur en carbone. Une analyse type correspond au tableau ci-dessous (1870) :

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

On remarque des teneurs élevées en phosphore et faibles en silicium, manganèse et surtout en carbone qui se trouvent à la limite de celle du fer et de l'acier doux.

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

En 1880, la résistance à la traction était d'environ 90 kg/mm², 100 kg/mm² en 1900.

Vers 1950, la composition chimique de l'acier des fils élémentaires était voisine de celle indiquée ci-dessous :

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

et la résistance à la traction était de l'ordre de 120 kg/mm².

Puis des taux de carbone plus élevés (0,75 à 0,80%) permirent d'atteindre des résistances aux environs de 150 à 160 kg/mm².

En 1965, cette résistance à la traction était portée à 165 - 180 kg/mm² pour les fils ronds ; à 155 - 170 kg/mm² pour les fils profilés en Z.

Ainsi l'amélioration des propriétés mécaniques a-t-elle été obtenue en relevant la teneur en carbone de l'acier, en affinant sa structure, et en utilisant, pour la mise en forme finale, des écrouissages à froid par laminage ou tréfilage.

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

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

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

III-2.2 - Les fils profilés

Les fils profilés (en Z, par exemple) sont obtenus par laminage à froid d'un fil machine préalablement traité thermiquement par patentage, afin que la structure de l'acier soit affinée. Le fil machine employé a une structure identique à celle du fil machine patenté utilisé pour le tréfilage. La structure fine obtenue permet de fortes déformations plastiques imposées lors du laminage à froid, et la réalisation de profils complexes sans rupture ni décohésion.

Les propriétés mécaniques obtenues sont inférieures de 10 à 15 % à celles qui peuvent être atteintes par tréfilage d'un même fil machine. La sensibilité de ces fils aux effets de traction déviée et d'entaille est également notable.

III-2.3 - Les fils galvanisés

La galvanisation à chaud des fils ronds ou profilés les protège des phénomènes de corrosion généralisée (dissolution) même si le revêtement est légèrement détérioré. Cette galvanisation par trempé dans un bain de zinc fondu est généralement postérieure à tout traitement technologique de mise en forme. Elle entraîne une diminution des propriétés mécaniques du fil clair d'environ 10 %. C'est pourquoi, les fils tréfilés ou laminés à froid sont plus écrouis lorsqu'ils doivent être galvanisés que lorsqu'ils sont utilisés sans galvanisation. Hormis cette différence, les fils élémentaires pour câbles toronnés à fils galvanisés sont identiques à ceux utilisés pour les câbles toronnés à fils clairs ; chaque fil est galvanisé en usine. L'épaisseur de la galvanisation est telle qu'il y ait de 280 à 430 g de zinc / m² (40 à 60 µm).

III-2.4 - Spécifications

Les spécifications relatives aux fils font l'objet de la norme française NF A 47-542 "Fils destinés aux câbles pour appareils de remontées mécaniques et structures suspendues - Spécifications".

Les spécifications concernant la galvanisation sont celles de la norme française NF A 91-131 "Fils d'acier galvanisés à chaud - Spécifications du revêtement de zinc".

III-3 - LES CÂBLES

Dans les ouvrages les plus anciens, les câbles sont des câbles à fils parallèles. Ensuite sont apparus les câbles torsadés, puis les câbles toronnés à fils clairs. Actuellement, on utilise souvent des câbles toronnés à fils clairs ou galvanisés, clos ou non.

Parallèlement à cette évolution dans les câbles, on remarque une évolution au niveau des suspentes, et des attaches de suspentes.

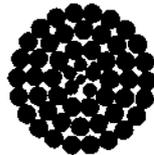
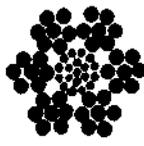
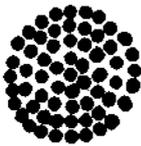


Fig. III-1- Câble à fils parallèles.

Fig. III-2- Câble torsadé.

Fig. III-3- Câble toronné non clos.

III-3.1 - Les différents types de câbles

Câbles à fils parallèles (fig. III-1)

On a commencé en France par fabriquer des câbles sur place, en unissant un grand nombre de fils parallèles. Ce procédé de fabrication est très long ; après la mise en place de tous les fils d'un même câble, une bobine les serre en enroulant autour d'eux à intervalles réguliers une frette, constituée d'un fil posé sous tension. Les fils n'étaient pas toujours d'une seule longueur et leurs extrémités étaient ligaturées et non soudées.

Câbles torsadés (fig. III-2)

Il y a sur quelques ouvrages anciens des câbles torsadés. Ceux-ci sont constitués par des torons de faible diamètre (7 ou 19 fils) câblés entre eux. Ce câblage consiste à enrouler les torons (6 à 8 suivant la composition du câble) autour d'une âme centrale métallique ou textile.

Câbles toronnés non clos (fig. III-3)

Depuis de nombreuses années, les câbles sont préfabriqués en atelier sous forme de monotorons.

Les fils sont livrés en bobines qui sont montées sur une machine à toronner. Puis ils sont enroulés en hélice, en plusieurs couches circulaires composées de 6, 12, 18 ... fils. Le sens de l'hélice est inversé d'une couche à l'autre pour éviter le déroulage du toron.

En règle générale, le diamètre des fils est compris entre 4 et 5 mm. Les diamètres les plus courants sont 4,7 et 4,9 millimètres.

Les câbles ont des diamètres variables en fonction du diamètre des fils constitutifs et du nombre de couches. Les câbles que l'on rencontre le plus souvent comportent :

- 127 fils répartis en 6 couches :
(1 . 6 . 12 . 18 . 24 . 30 . 36) ;
- 169 fils répartis en 7 couches :
(1 . 6 . 12 . 18 . 24 . 30 . 36 . 42) ;
- 217 fils répartis en 8 couches :
(1 . 6 . 12 . 18 . 24 . 30 . 36 . 42 . 48).

Il faut remarquer, dans certains cas, qu'en fonction du diamètre des fils élémentaires, un de ceux-ci manque au niveau des deuxième ou troisième couches pour éviter un interstice dans les couches périphériques.

Les fils peuvent être soudés pour les câbles de grande longueur, mais les points de soudure doivent être répartis sur toute la longueur du câble.

Câbles toronnés clos (fig. III-4)

Les câbles clos ont été mis en oeuvre sur quelques ouvrages ; ils sont constitués de couches internes de fils ronds et de couches externes (une ou deux) de fils de profils spéciaux, en forme de trapèzes ou de Z.

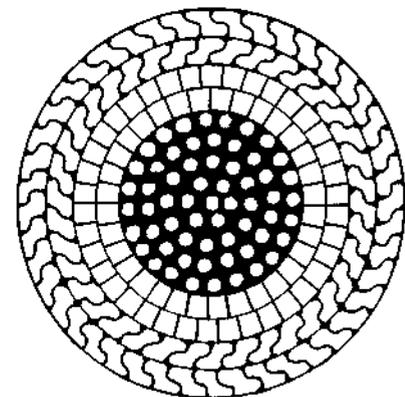
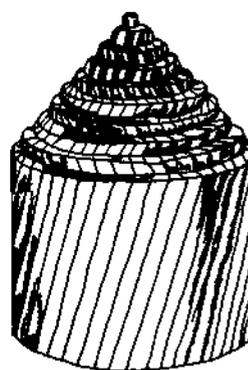


Fig. III-4- Câble toronné clos.

Ces derniers s'emboîtent les uns dans les autres. La surface externe du câble est cylindrique et lisse. Les fils ronds des couches internes ont les mêmes caractéristiques que ceux utilisés pour les câbles non clos ; les fils profilés ont, par contre, une résistance inférieure.

Toutefois, le câble clos n'est pas nécessairement un câble étanche, comme l'expérience l'a montré.

Câbles toronnés à fils galvanisés

Les câbles toronnés à fils galvanisés sont actuellement les câbles les plus utilisés, en particulier en France, lors du remplacement de câbles anciens.

III-3.2 - Comparaison entre les types de câbles

Deux facteurs peuvent être retenus pour comparer les divers types de câbles (câbles à fils parallèles et câbles toronnés, clos ou non) :

- les caractéristiques et le comportement mécaniques ;
- l'aptitude à résister à la corrosion.

Caractéristiques et comportement mécaniques

Une première différence apparaît au niveau du module d'élasticité, les câbles à fils parallèles présentant un module d'élasticité voisin de celui des fils les constituant, soit $E \simeq 200\ 000$ MPa, tandis que le module des câbles toronnés est notablement plus faible ; ce dernier est lié au pas de câblage des fils constitutifs qui a tendance à s'allonger lors de l'application d'une charge.

Une bonne évaluation du module d'élasticité d'un câble toronné peut être faite par la formule :

$$E_c = E \cos^3 \alpha$$

où E est le module d'élasticité des fils et α l'angle de câblage.

Dans la pratique, il est raisonnable de compter sur un module d'élasticité de l'ordre de $165\ 000$ MPa ± 5000 , sachant qu'une valeur de $170\ 000$ MPa doit être considérée comme une valeur limite ; en effet, une forte valeur de module implique un angle de câblage faible qui, notamment pour les câbles de fort diamètre, risque d'entraîner une désorganisation de ces derniers lors des opérations de maintenance au cours du montage sur site.

Par ailleurs, un câble sortant d'usine ne présente pas une compacité optimale et l'application d'un

premier chargement a pour effet de resserrer les fils constitutifs les uns contre les autres ; ce phénomène entraîne un allongement notablement supérieur à celui d'un câble en service et peut conduire à un module d'élasticité apparent de l'ordre de $140\ 000$ MPa. Afin de procéder à cette première mise en place des fils, les spécifications américaines en la matière prescrivent une pré-tension en usine à une charge qui ne doit pas dépasser 55 % de la charge de rupture ; cette opération provoquant, par ailleurs, un allongement rémanent.

Une seconde différence entre câbles à fils parallèles et câbles toronnés réside dans leur comportement mécanique dans le temps. En effet, un fil d'acier soumis à une charge permanente peut être sujet au fluage, allongement sous charge constante. Pour les câbles à fils parallèles, ce phénomène, d'origine métallurgique, peut être considéré comme négligeable compte tenu du taux des contraintes de service. Pour les câbles toronnés, à ce phénomène s'ajoute un fluage général dû au serrage progressif des fils constitutifs ; bien que moins sensible que lors d'une première mise en tension, ce comportement conduit néanmoins à des allongements non négligeables au cours du temps. Des constatations effectuées sur ouvrage, à l'étranger, font état d'un allongement par fluage de 0,018 %, en treize ans. Cela conduit, pour les ponts suspendus, à un abaissement général du profil en long dont l'importance est fonction de la portée de l'ouvrage.

A titre d'exemple, pour un ouvrage suspendu de 100 m de portée comportant des pylônes de 10 m de hauteur, la valeur indiquée ci-dessus conduit à une augmentation de flèche de l'ordre de 50 millimètres.

Aptitude à résister à la corrosion

Les principaux facteurs régissant l'aptitude à résister à la corrosion sont les suivants :

- la facilité de pénétration de l'eau qui dépend de la structure du câble ;
- la qualité du fil et de son revêtement de surface.

Du fait de la structure compacte des câbles à fils parallèles, le système de protection anticorrosion, s'il n'est pas esthétique d'aspect, est relativement efficace. Cela explique que la corrosion généralisée se limite aux zones où la protection anticorrosion s'est dégradée.

Par ailleurs, on peut remarquer que les vieux câbles à fils parallèles ne présentent que peu de ruptures de fils élémentaires. Celles-ci sont en général dues à

la corrosion par "piqûre". Il n'a pas été observé, jusqu'à présent, de ruptures de fils par corrosion fissurante sous tension. Cela provient en grande part du fait que l'acier constitutif des fils élémentaires, en raison de ses caractéristiques mécaniques peu élevées, ne présentait pas une composition défavorable à cet égard.

Les câbles clos présentent une couche extérieure (ou deux) où les fils s'imbriquent les uns dans les autres, ce qui apporte vis-à-vis des câbles toronnés non clos une réduction de la vitesse de pénétration de l'eau à l'intérieur du câble. En contrepartie, les câbles clos sont raides et, dans le cas de câbles paraboliques, il se produit au niveau des colliers d'attache des suspentes une légère cassure qui ouvre les joints entre les fils des couches extérieures, facilitant l'entrée de l'eau qui, du fait de la structure du câble, ressort difficilement ; ce qui explique que, dans quelques cas récemment observés, la deuxième couche (à partir de l'extérieur) était oxydée.

Pour les câbles toronnés clos ou non, la meilleure protection contre la corrosion réside dans la galvanisation des fils dont il faut cependant reconnaître qu'elle diminue certaines propriétés technologiques de ces derniers. En outre, la résistance à la traction diminue de 5 à 10 %, par rapport au même fil avant galvanisation, le nombre de torsions à la rupture décroît de 10 à 20 %. Par contre, l'allongement plastique est augmenté de 200 à 300 %. Par ailleurs, le coût des câbles est augmenté de 10 à 20 % par rapport aux câbles toronnés à fils clairs de même résistance.

Chaque type de câble a ses avantages et ses inconvénients. Si les câbles torsadés ne sont plus utilisés depuis longtemps, l'unanimité ne s'est faite en faveur de l'utilisation d'aucun autre type de câble particulier.

En Europe, la préférence va vers les câbles toronnés, clos ou non clos, fabriqués en usine, avec en France un avantage pour les derniers, en raison des risques de désorganisation des couches externes des câbles clos, en particulier lors du passage sur les selles d'inflexion, alors qu'en Allemagne on utilise systématiquement des câbles clos comportant 3 voire 4 couches de fils Z. L'ancrage est assuré par des culots.

Aux Etats-Unis, la suspension de la plupart des grands ouvrages est réalisée à l'aide de câbles à fils parallèles ; compte tenu des portées mises en oeuvre, l'un des critères de choix est la possibilité

de constituer sur place, fil par fil, des câbles de forte section, chaque fil étant ancré individuellement.

Par ailleurs, les avantages techniques de la galvanisation sont maintenant reconnus et, excepté les cas de certaines atmosphères agressives nécessitant des systèmes spéciaux de protection par peinture, elle est recommandée sous la réserve que des précautions soient prises en matière de choix et d'application du système de peinture (voir chapitre VII-7).

III-4 - DISPOSITIONS GÉOMÉTRIQUES DES CÂBLES

Les câbles élémentaires (même de gros diamètre) ont une section insuffisante pour supporter les efforts. De plus, un seul câble porteur par ferme n'est pas une disposition satisfaisante du point de vue de la sécurité car sa rupture accidentelle entraînerait la ruine de l'ouvrage.

Les câbles élémentaires sont donc groupés en nappe (câbles non jointifs) en faisceau ou en couronne, ces deux dernières dispositions présentant des inconvénients notables.

III-4.1 - Câbles groupés en nappe

Les câbles peuvent être groupés soit en une seule nappe horizontale, soit en plusieurs nappes horizontales (en général deux).

Il peut y avoir, suivant l'ouvrage, deux câbles par nappe ou plus.

Diverses dispositions de câbles sont données sur le schéma de la figure III-5.

Ces dispositions, classiques pour les ouvrages anciens, ont l'avantage de permettre une ventilation des câbles élémentaires, ce qui diminue les risques de corrosion. De plus, la remise en peinture est facilitée par l'espacement des câbles. Ces dispositions sont donc celles qui entraînent le moins de foyers de corrosion (voir aussi colliers d'attache des suspentes).

III-4.2 - Câbles groupés en faisceau ou en couronne

Dans certains ouvrages plus récents, les câbles sont groupés en faisceau ou en couronne. Dans le cas d'ouvrages ayant un grand nombre de câbles

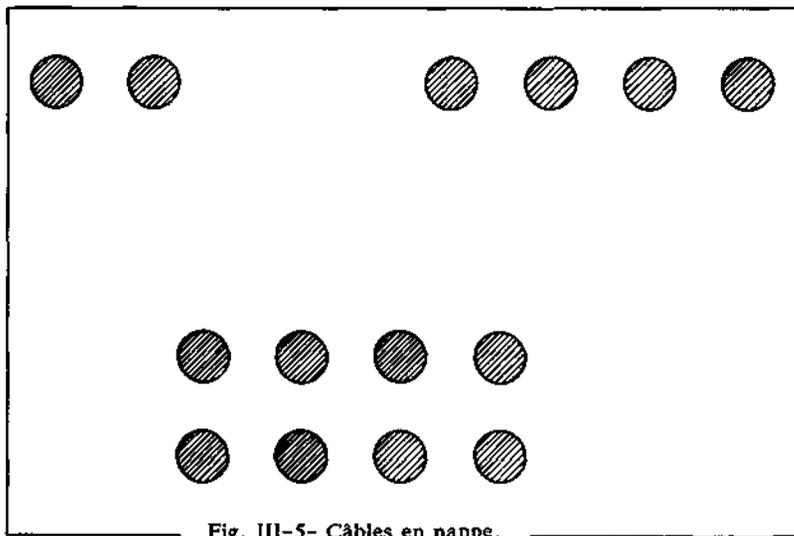


Fig. III-5- Câbles en nappe.

élémentaires, cela réduit notablement l'encombrement.

Le nombre des câbles peut varier de 3 à 60 (pont de Tancarville). On rencontre le plus couramment des faisceaux ou des couronnes de 6 à 8 câbles (fig. III-6a).

Dans le cas de câbles groupés en couronne, l'espacement entre les câbles est réalisé par un noyau central légèrement tronconique au niveau des colliers d'attache des suspentes (fig. III-6b). Si cet espacement permet, comme dans le cas des câbles en nappe, une aération et un entretien plus facile en partie courante, il faut noter cependant que le noyau central a tendance à retenir l'eau et cela crée souvent des foyers d'oxydation à ce niveau. De plus, pour permettre l'ancrage des câbles en chambre d'ancrage (ou sur massif) un collier est nécessaire pour permettre l'épanouissement des câbles. Ce collier est un lieu préférentiel pour la corrosion, de même que les selles d'infléchissement quelquefois rendues nécessaires par le tracé du faisceau, et nécessite une protection particulièrement soignée (voir chapitre VII-4).

Les faisceaux présentent de nombreux inconvénients du point de vue de la corrosion ; outre la localisation au niveau de la selle d'épanouissement comme dans le cas des câbles groupés en couronne, la corrosion se développe aussi à l'intérieur du faisceau.

En effet, les câbles élémentaires intérieurs au faisceau et les parties de câbles intérieures ne sont pas aérés. Ainsi l'eau qui s'infiltré dans les gorges

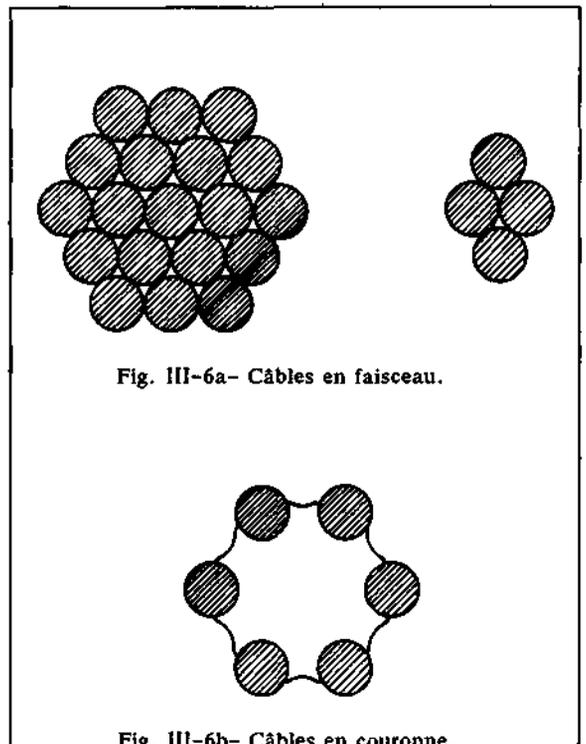


Fig. III-6a- Câbles en faisceau.

Fig. III-6b- Câbles en couronne.

entre les câbles et à l'intérieur de ces derniers, stagne très longtemps à l'intérieur du faisceau, endroit qui ne peut être entretenu et protégé par de nouveaux produits anticorrosion. Il faut donc une très bonne protection extérieure et un masticage soigné (avec un mastic adéquat) des gorges supérieures du faisceau (le masticage des gorges inférieures empêcherait l'eau qui serait à l'intérieur de ressortir) (voir chapitre VII-3.8).

III-5 - LES SUSPENTES

Les suspentes, organes de liaison entre les câbles et le tablier, peuvent être constituées soit de torons, soit de barres en acier ou en fer forgé.

III-5.1 - Les suspentes en fer forgé

Les suspentes en fer forgé sont les plus anciennes. Elles sont en une seule pièce et comportent, d'une façon générale, des boucles à chaque extrémité dans lesquelles viennent s'accrocher des étriers.

Du fait même de la nature du matériau et des systèmes d'attache, elles sont peu sensibles à la corrosion.

III-5.2 – Les suspentes toronnées

Les suspentes toronnées sont, comme les câbles, composées de fils tréfilés, mais le diamètre de ces derniers est plus faible.

De même que les câbles, elles peuvent être soumises aux effets de la corrosion due à la circulation d'eau à l'intérieur des torons. Les suspentes peuvent se présenter sous deux formes :

– *suspentes à brin unique*, munies d'un culot à chaque extrémité ; l'eau peut s'infiltrer, soit par le culot supérieur, soit le long de la suspente et stagner au niveau du culot inférieur qui constitue alors un foyer préférentiel de corrosion ;

– *suspentes à deux brins*, il s'agit en général d'un toron unique passant au-dessus d'un collier fixé sur les câbles de suspension ; l'ancrage est assuré en partie basse, à l'aide de deux culots. Dans ce cas, le faible rayon de courbure, au passage au-dessus des câbles, donne lieu à un écrasement de la suspente et à un écartement des fils des couches périphériques, favorisant les entrées d'eau. Comme précédemment, l'eau circule à l'intérieur de la suspente et stagne en partie basse, au niveau des culots, entraînant des risques de corrosion.

III-5.3 – Les suspentes en barre d'acier

Les suspentes en barre d'acier sont réalisées le plus généralement en acier mi-dur du type XC-38, par exemple. Elles sont utilisées à l'état brut de laminage ou, de préférence, après un traitement de normalisation ; elles comportent, à chaque extrémité, un filetage permettant l'accrochage sur les organes d'attache, disposition préférable à une liaison par soudage qui ne permet pas de réglage et requiert des techniques d'exécution particulières.

A la différence des suspentes toronnées, ce sont des suspentes rigides qui ne peuvent encaisser, principalement pour les suspentes courtes, les moments de flexion dus aux mouvements relatifs du tablier et de la suspension. Il convient donc que les organes d'attache, en parties haute et basse, soient convenablement articulés, faute de quoi on assiste à des concentrations de contraintes en fond de filetage, dues aux efforts parasites et pouvant entraîner des fissurations, voire même des ruptures.

Des applications ont, par ailleurs, été effectuées avec des barres en acier E 36.3 comportant des extrémités refoulées et filetées. Cette solution présente deux avantages :

– d'une part, la partie fileté ayant un diamètre plus

important que la partie courante de la barre, le poids d'acier mis en oeuvre est inférieur ;

– d'autre part, l'acier E 36.3 présente des caractéristiques de résilience meilleures que l'acier XC-38, ce qui réduit les risques de fissuration à fond de filet.

Sous réserve que les conditions d'articulation des attaches citées plus haut soient respectées, il apparaît que ce type de suspente présente les meilleures garanties.

III-6 – ANCRAGES ET ORGANES D'ATTACHE DES CÂBLES ET SUSPENTES

III-6.1 – Les culots

Les câbles élémentaires sont fixés à leurs points d'attache par des pièces appelées "culots".

Ceux-ci sont des pièces massives en fonte pour les anciens culots ou en acier moulé pour les culots plus récents. Ils comportent deux, trois ou quatre trous (selon le diamètre du câble élémentaire) pour le passage des tirants de fixation, et un trou central pour le passage du câble.

a) Culottage des câbles (fig. III-7)

Le culottage des câbles se fait en plusieurs opérations :

– pose des ligatures dont une se trouvera en un point situé sous le bas du culot ;

– préparation du câble en "chignon" (ou perruque). Cette opération consiste à détordonner la partie du câble située au-dessus de la dernière ligature, à mettre les fils en gerbe régulière et à retourner l'extrémité de chaque fil vers l'intérieur du chignon ;

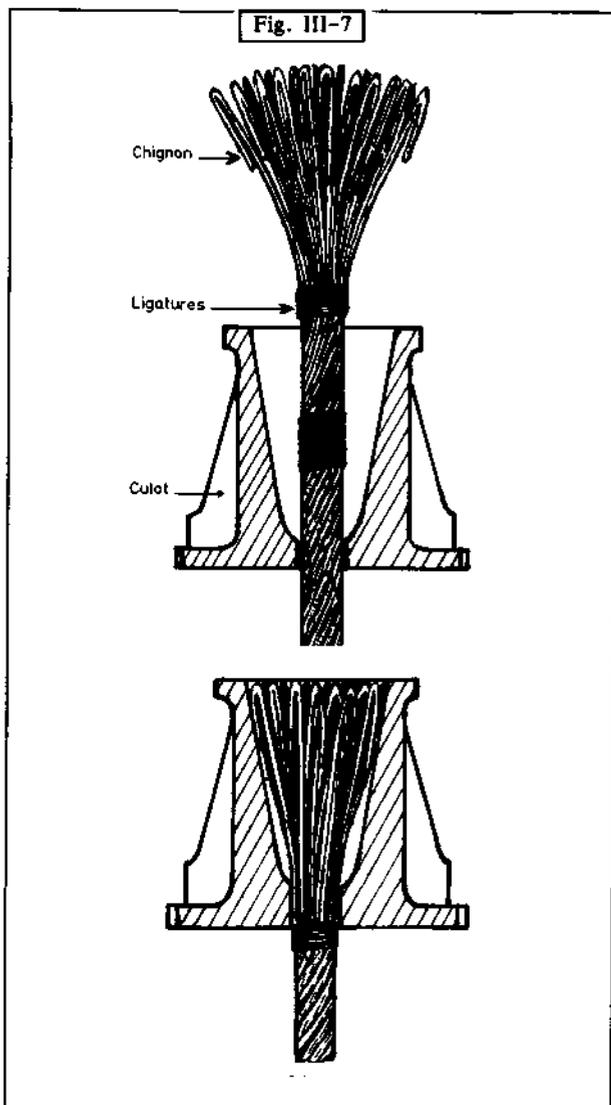
– enfoncement du chignon dans son logement par traction au vérin ;

– chauffage du culot pour éviter le refroidissement trop rapide du métal fusible, et remplissage de la cavité par le métal fusible.

Ce métal fusible était :

– soit un alliage binaire composé de 90 % de zinc de haute teneur, et de 10 % d'antimoine, coulé à une température de 500-550 °C (point de fusion 450 °C) ;

– soit un alliage ternaire composé de 84 % de plomb, 7 % d'étain et 9 % d'antimoine. Cet alliage



se coule à une température de 340-350 °C (point de fusion 240 °C).

Actuellement, on utilise du zinc pur à haute teneur (> 99,5 %) porté à une température de 500 °C recommandé pour son efficacité contre la corrosion (point de fusion 420 °C).

Cette température doit être respectée : plus élevée, le zinc recuirait les fils élémentaires, particulièrement ceux des petits câbles ; plus basse, le zinc se solidifierait avant d'avoir atteint la base du culot. Dans le cas où le remplissage du culot s'effectue avec du zinc pur, on peut vérifier la température de celui-ci avec une baguette de sapin. Celle-ci, plongée dans le zinc et retirée vivement, ne devra comporter aucune trace de zinc et n'être que légèrement décolorée par la chaleur. Si le zinc adhère à la baguette, c'est qu'il est trop froid, si la baguette carbonise, c'est qu'il est trop chaud.

Toutes ces opérations se déroulent avec le câble en position verticale pour permettre au métal fusible de descendre à l'extrémité inférieure du culot. Il est

nécessaire, pour garantir un bon remplissage, que le métal fusible ressorte à l'extrémité inférieure du culot.

b) *Forme des culots*

Le logement dans lequel s'engage le "chignon" peut avoir plusieurs formes. Dans les premiers culots en fonte, ce logement avait la forme représentée sur la figure III-8. La trop grande longueur de la partie cylindrique ne permettait pas au métal fusible d'arriver jusqu'à l'extrémité, ce qui permettait l'entrée de l'eau dans le vide subsistant entre câble et culot.

Dans les derniers culots en fonte, puis les culots en acier moulé, cette longueur de la partie cylindrique a été réduite pour aboutir à la forme présentée sur la figure III-9.

La solution adoptée maintenant pour les nouveaux culots en acier moulé est la forme dite "en tulipe" (fig. III-10), de façon à avoir un gradient de pression uniforme de l'extrémité du culot à l'orifice de sortie du câble, et un meilleur remplissage du culot par l'alliage fusible.

c) *Défauts au niveau des culots*

Avant culottage, un câble coupé droit se présente comme sur la figure III-11a. Pour recevoir l'alliage fusible, le culot doit se présenter verticalement, avec son ouverture en haut et lors de la mise en position, il risque d'y avoir un glissement relatif des couches de fils entre elles (de 30 à 60 mm) comme le montre la figure III-11b. Après culottage (fig. III-11c) lors de la mise en position "câbles en service" le phénomène inverse se produit et les fils extérieurs sont plus tendus. C'est la raison pour laquelle, dans la plupart des cas, les ruptures de fils se produisent souvent sur les couches périphériques qui subissent des contraintes plus élevées. Ces fils des couches périphériques représentent une part importante de la section des câbles d'où diminution importante du coefficient de sécurité (pour un câble courant de 169 fils, la dernière couche, 42 fils, représente le quart de la section).

Le problème le plus important est la corrosion des fils due au séjour de l'eau au voisinage des culots.

Dans le cas d'un mauvais remplissage, l'eau s'arrête à l'intérieur du culot au contact du métal fusible et entraîne la rupture des fils par corrosion fissurante (fig. III-12a). Cette rupture d'un certain nombre de fils entraîne un report de contrainte sur les autres fils élémentaires et une rupture du câble à brève échéance (pont de Meyronne dans le Lot - pont de Serrières en Isère).

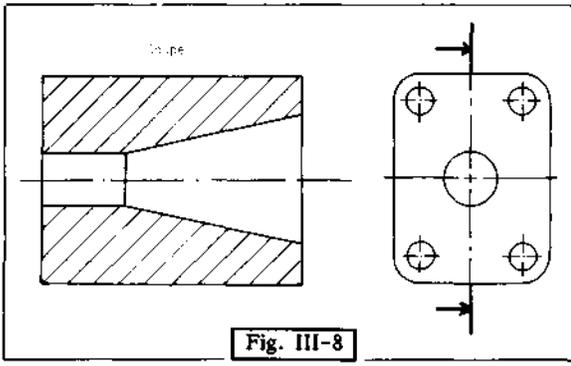


Fig. III-8

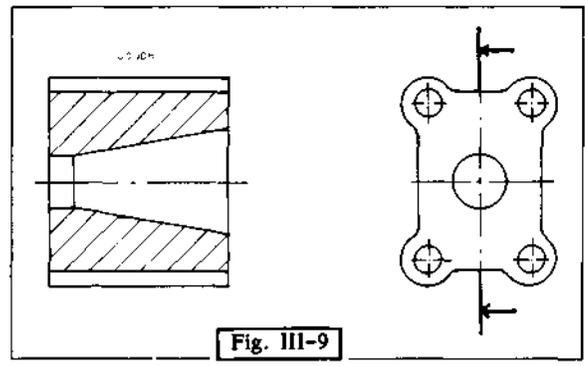


Fig. III-9

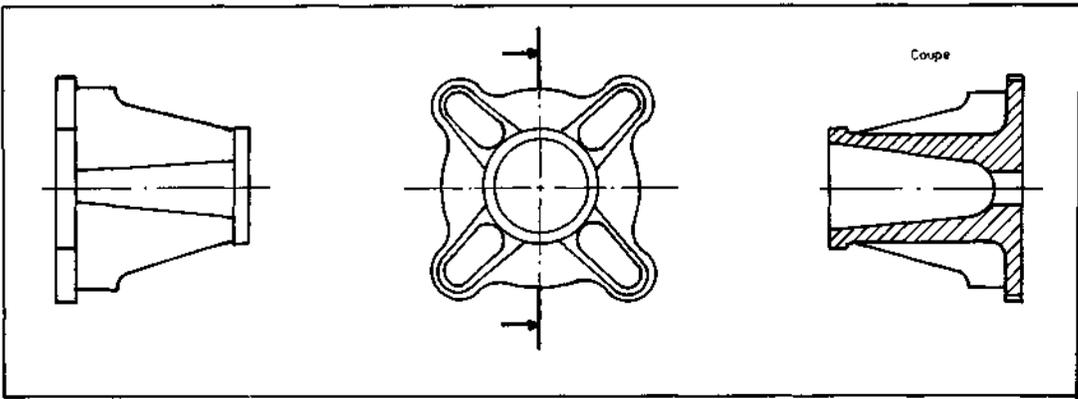


Fig. III-10

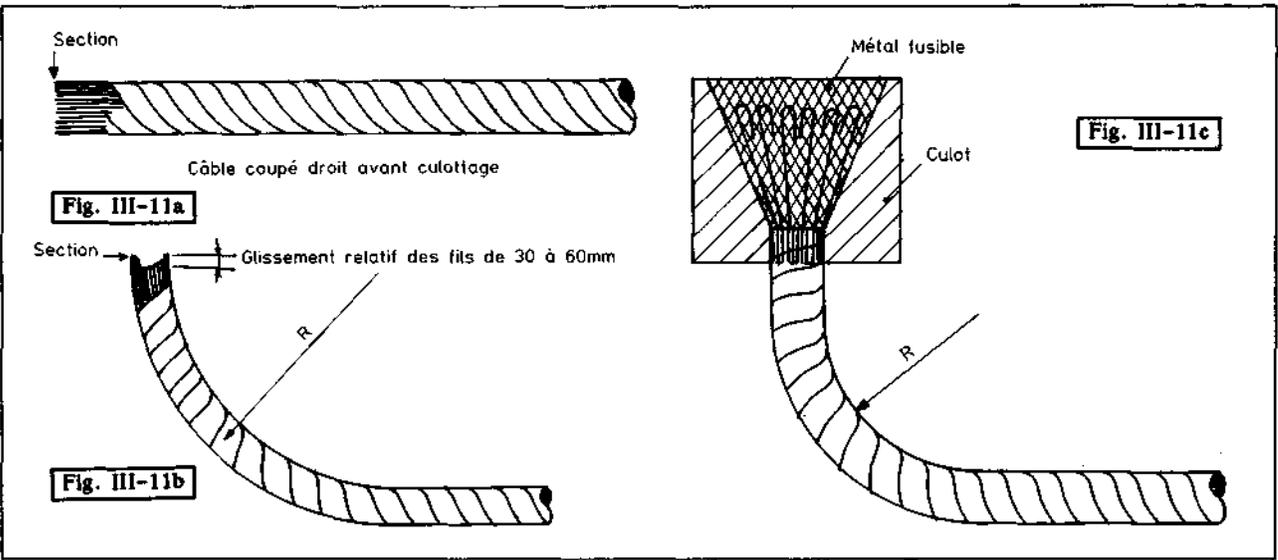


Fig. III-11c

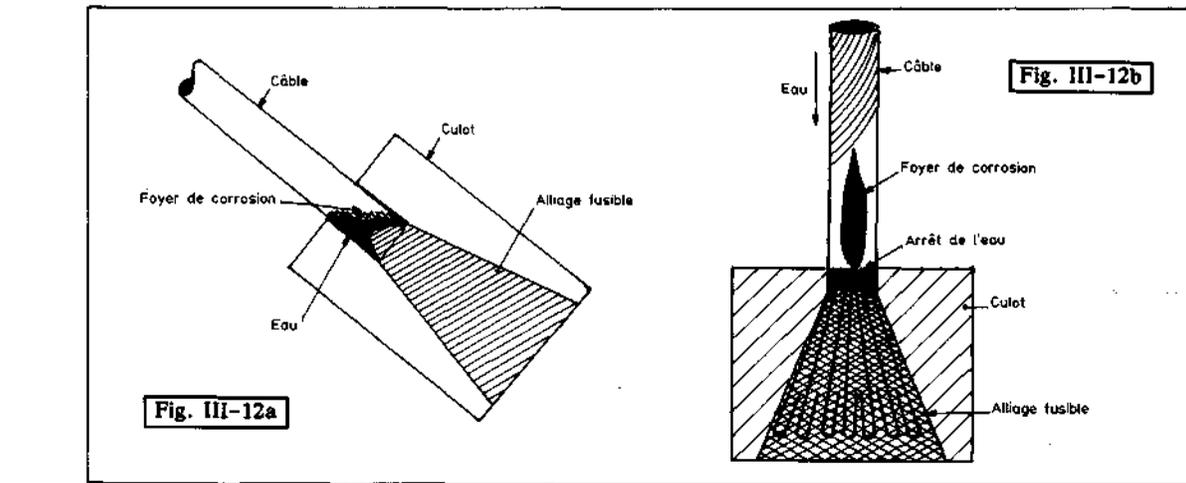


Fig. III-12a

Fig. III-12b

Dans le cas des câbles verticaux ou obliques, même avec un remplissage correct, l'eau arrêtée par le métal fusible séjourne à la partie inférieure du câble et forme un foyer de corrosion de forme ovoïde (le maximum de section étant au niveau du culot) comme le montre la figure III-12b. Ce foyer de corrosion amène, à terme, un gonflement du câble qui peut éventuellement être décelé par un contrôle visuel avant rupture.

Les entrées d'eau dans les culots se produisent également, quand le diamètre d'entrée dans le culot est important par rapport au diamètre du câble, et que l'étanchéité à ce niveau est mal réalisée.

On peut remarquer par ailleurs, en particulier sur les culots en fonte, une fissuration du métal. Celle-ci se produit soit à l'entrée du câble dans le culot, soit au niveau des trous permettant le passage des tirants (pont du Pertuiset sur la Loire - pont de Boran sur l'Oise) ; elle est due au gel, par grand froid, de l'eau d'infiltration qui s'est accumulée.

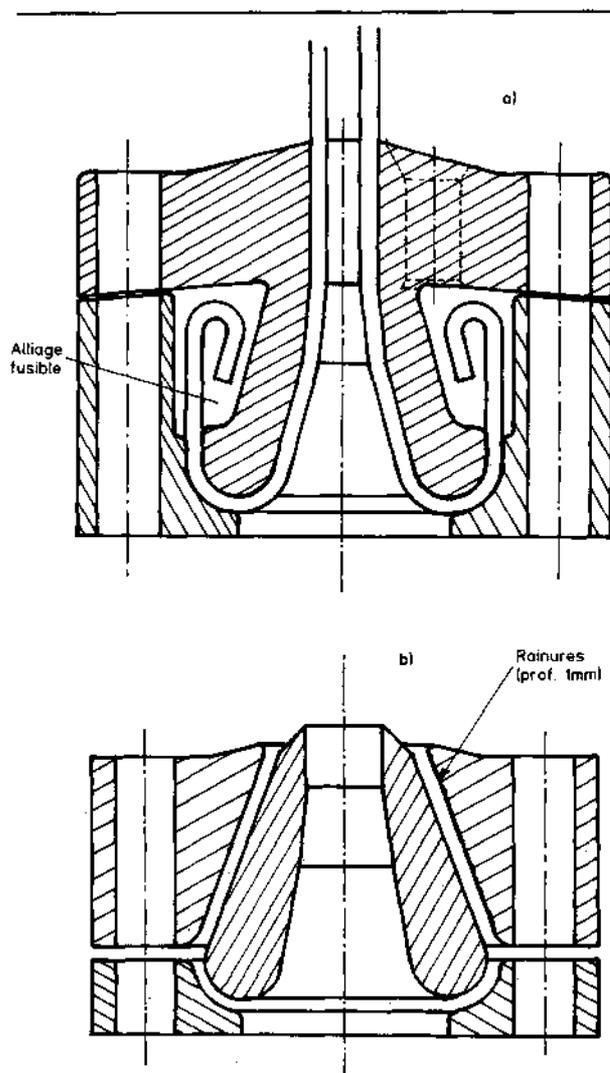


Fig. III-13

d) Culots spéciaux

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

- culot avec ancrage des fils au zinc,
- culot avec auto-ancrage sans métal de culottage.

Dans les deux cas, les vides entre les fils ne sont pas obstrués et l'eau peut s'écouler librement par une extrémité du culot (fig. III-13). Ces culots, réalisés actuellement pour des câbles de petits diamètres (37 fils de 4,7 mm), n'ont été placés que sur le pont de Capens en Haute-Garonne. Un examen de ces culots et des fils intérieurs après cinq ans de service, a permis de constater qu'il n'y avait pas de coulure d'oxyde ni de trace de corrosion au niveau des culots.

III-6.2 - Étriers et tirants d'ancrage

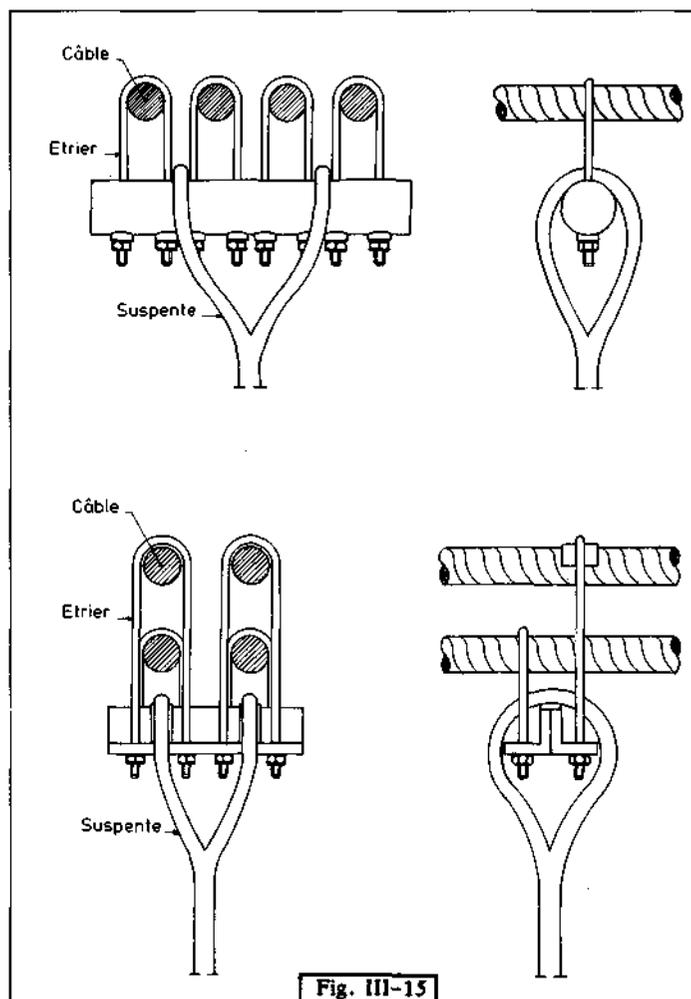
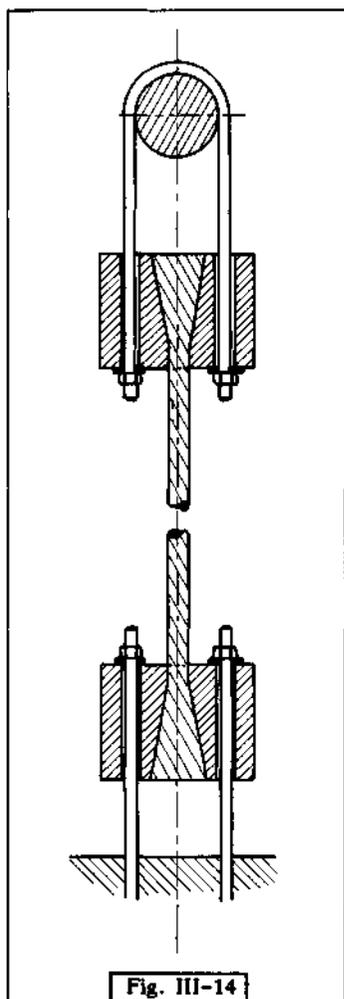
Les culots équipant les extrémités de câbles sont généralement attelés à l'aide d'étriers ou de tirants fixés aux points d'ancrage : axes ou goujons de chariot en tête de pylônes, supports fixés au tablier, massif d'ancrage...

Ces étriers ou tirants sont, en général, des barres d'acier mi-dur, du type XC-38 par exemple ; ils passent à l'intérieur de trous cylindriques aménagés dans l'épaisseur du culot. Le blocage est assuré par un écrou monté en extrémité fileté des barres (fig. III-14).

Par construction, ce dispositif présente un vide annulaire entre les barres et la surface intérieure des trous, fermé de façon pratiquement étanche à l'une de ses extrémités par l'écrou de blocage. Lorsque les barres ont leurs extrémités filetées, avec l'écrou de blocage, tournées vers le bas, l'eau de ruissellement peut s'infiltrer dans ces vides annulaires et ne peut s'évacuer : c'est le cas pour les étriers fixés sur chariots en tête de pylônes.

Il en résulte alors une corrosion, dans une zone inaccessible à l'inspection visuelle, accompagnée parfois de fissures. Ces dernières, que l'on ne peut déceler qu'en effectuant un démontage, sont dangereuses, notamment dans le cas où les éléments concernés seraient constitués d'aciers fragiles n'offrant, à basse température, pratiquement aucune résistance à la propagation de la fissuration.

Par mesure préventive, il est nécessaire d'obturer l'entrée des vides annulaires, située en partie haute,



par une collerette au chanvre bitumineux et carborène ou une collerette spéciale en néoprène.

III-6.3 - Fixation des suspentes aux câbles porteurs

Le problème consiste à attacher des suspentes verticales sur un câble dont l'inclinaison varie de 0° à mi-portée à près de 30° au voisinage des pylônes.

L'accroissement, au cours du temps, des efforts unitaires transmis par les suspentes, a provoqué une évolution sensible de la morphologie des systèmes d'attache. A l'origine, les attaches étaient des étriers bouclés autour des câbles. Le glissement était empêché à l'aide de ligatures en fil de fer. Progressivement, ce dispositif a évolué pour donner naissance à des chevêtres serrés sur les câbles, et sur lesquels venait s'appuyer la suspente, puis aux colliers actuels.

Attaches des suspentes en fer forgé

Les attaches hautes de ces suspentes sont, en règle générale, des étriers bouclés autour des câbles ;

souvent les dispositifs d'articulation sont parties intégrantes des suspentes (fig. III-15). Ce type d'attaches ne présente que peu de désordres ; bien dimensionnées à l'origine, elles ont tendance, du fait de l'augmentation de charge due au trafic, à poinçonner les fils périphériques des câbles porteurs. Leurs ligatures de fixation sont à surveiller.

Attaches des suspentes en câble

Dans le cas des suspentes à un seul brin, le câble est muni d'un culot en haut et en bas de la tige. Le culot du haut peut être du type à oreilles ou à chape, fixé par un axe horizontal (fig. III-16). Il peut être attelé par tirants ou étriers ; les phénomènes de corrosion sont alors identiques à ceux des ancrages de câble porteur.

Dans le cas des suspentes à deux brins, il s'agit en général d'un câble unique passé à cheval sur un collier fixé sur les câbles ; les deux culots d'extrémité étant alors en partie basse (fig. III-17). Une attention particulière doit être portée aux phénomènes de corrosion qui peuvent se manifester au niveau de la bride destinée à rapprocher les deux brins et à les maintenir parallèles.

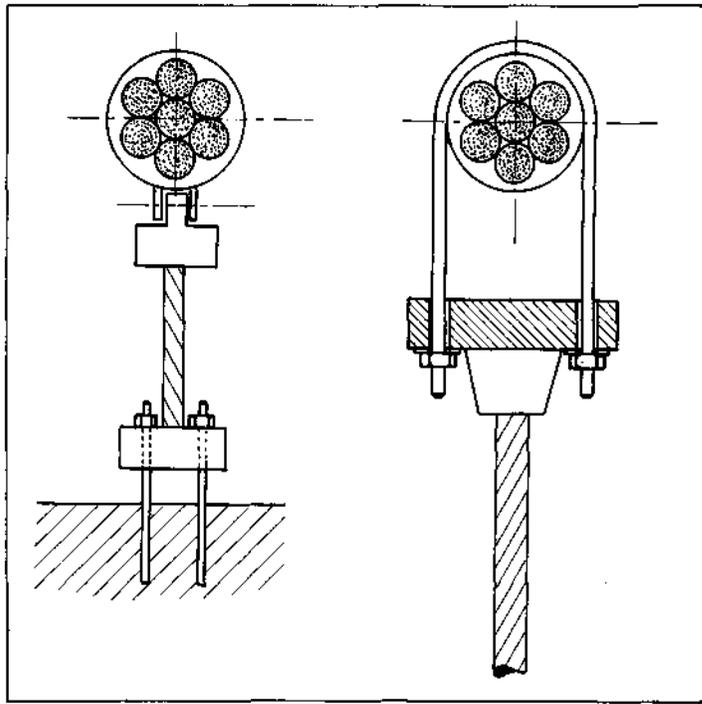


Fig. III-16

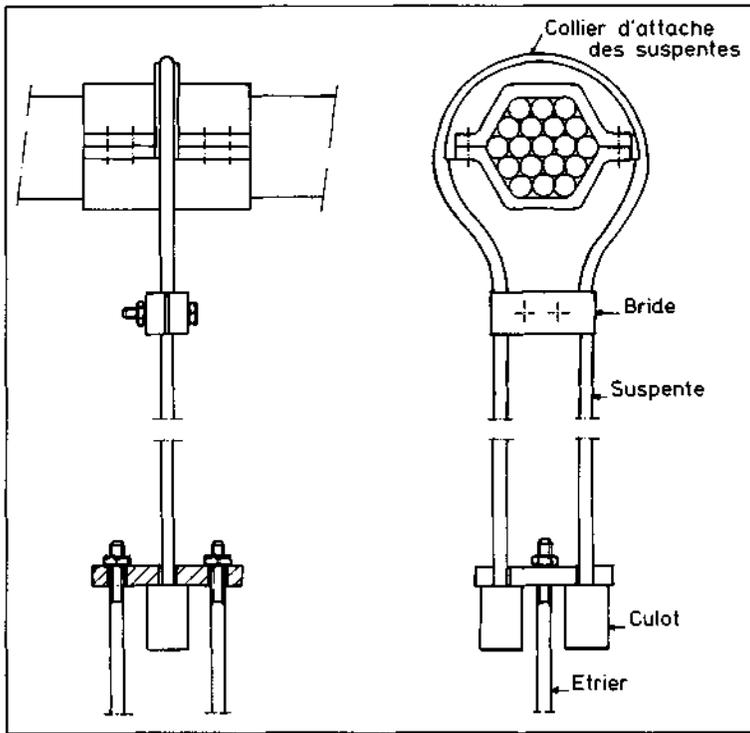


Fig. III-17

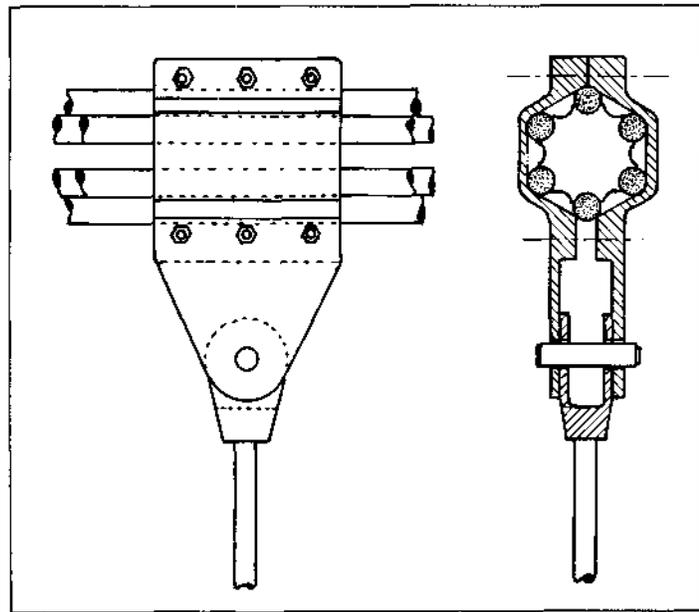


Fig. III-18

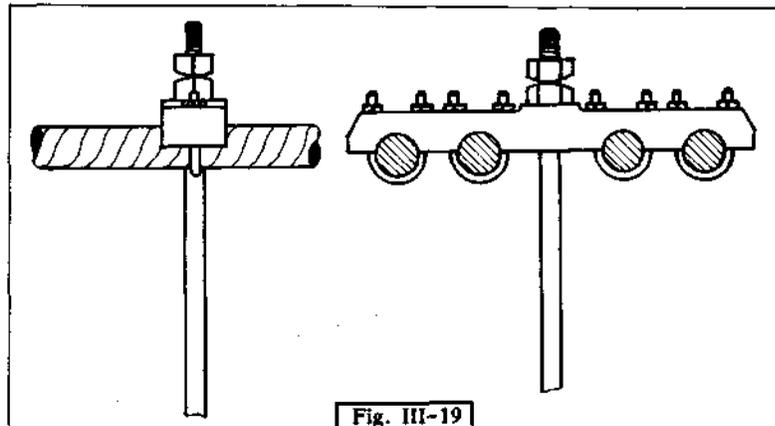


Fig. III-19

Attaches des suspentes en barre

La fixation des barres de suspente s'effectue soit par l'intermédiaire d'une chape (fig. III-18), soit par l'intermédiaire d'un chevêtre (fig. III-19) ; dans ce dernier cas, la suspente traverse le chevêtre et le réglage s'effectue à l'aide d'un écrou bombé ou de rondelles à couteaux permettant un débattement de la suspente autour de son axe vertical. Ce système de fixation est l'un des plus satisfaisants : le chevêtre répartit les charges sur les câbles, évitant les poinçonnements, sa faible largeur et son mode de fixation limitent la rétention d'eau et par là même les risques de corrosion.

Dans certains cas, la suspente en barre fait le tour d'un collier, comme dans le cas des suspentes en câble à deux brins ; le réglage s'effectue alors à l'aide de manchons filetés (fig. III-20).

Colliers

Les colliers sont utilisés dans le cas de câbles groupés en faisceau, ou en couronne ; ce sont des pièces en acier moulé enserrant les câbles dans deux demi-coquilles serrées l'une contre l'autre par boulonnage (fig. III-17 et 18). Dans le cas des câbles porteurs groupés en couronne, un noyau central permet de répartir l'effort de serrage sur chaque câble et de garder la disposition géométrique du faisceau.

Dans tous les cas, il est souhaitable que le plan de joint des colliers soit vertical pour permettre une meilleure évacuation des eaux. Mais, compte tenu de leur dimension, les colliers favorisent toujours l'accumulation d'eau au contact des câbles et peuvent vite devenir des "nids de rouille". L'examen et l'entretien des câbles dans les zones sous colliers sont difficiles, pour ne pas dire impossible sans une ouverture périodique.

III-6.4 - Fixation des suspentes au tablier

L'attache basse des suspentes se fait, le plus souvent, au droit des pièces de pont, soit sur ces dernières, soit sur un montant de la poutre de rigidité. On peut cependant trouver d'autres dispositions (poutre Warren sans montant, poutres à âme pleine).

Attaches des suspentes en fer forgé

Dans le cas général, les suspentes en fer forgé sont terminées par un oeilleton dans lequel passe un étrier en forme de U renversé et qui reprend les ef-

forts de la pièce de pont par une plaque d'appui (fig. III-21).

Ce système de liaison présente l'avantage d'être bien articulé et de ne pas retenir l'eau, offrant ainsi peu de prise à la corrosion.

Attaches des suspentes en câble

La liaison avec les pièces de pont se fait en général par l'intermédiaire d'un étrier (fig. III-22). Cet étrier, fixé au culot inférieur de la suspente ne présente pas de foyers de corrosion importants. Cependant, au niveau du culot, on retrouve les mêmes phénomènes de corrosion que pour les câbles porteurs.

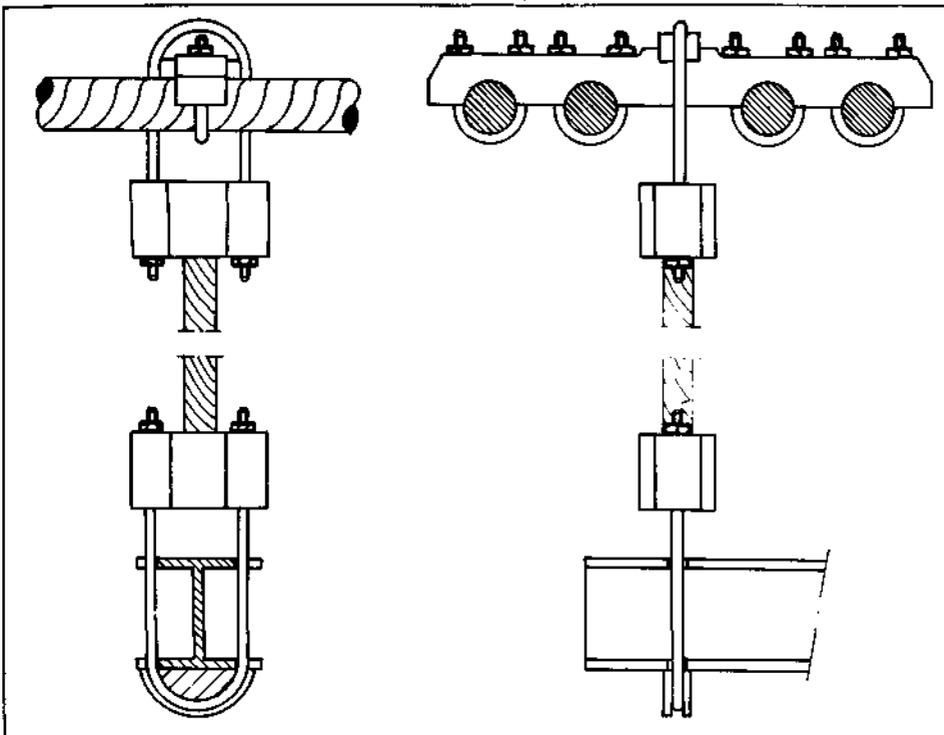
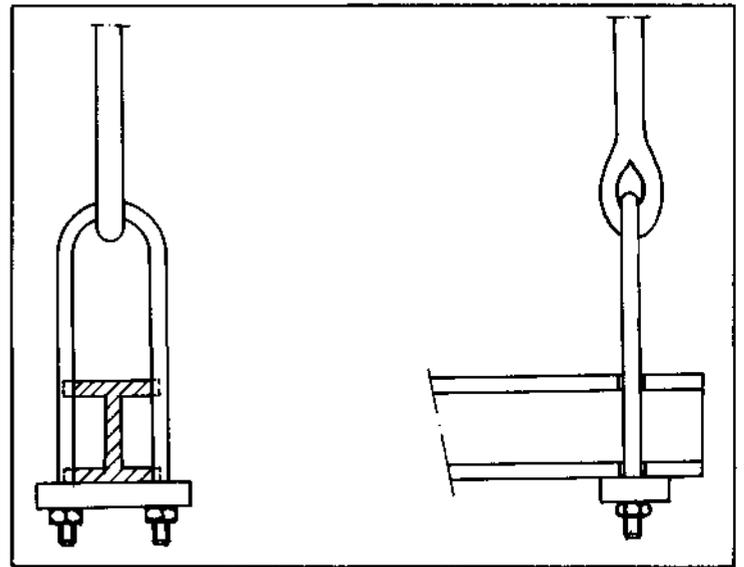
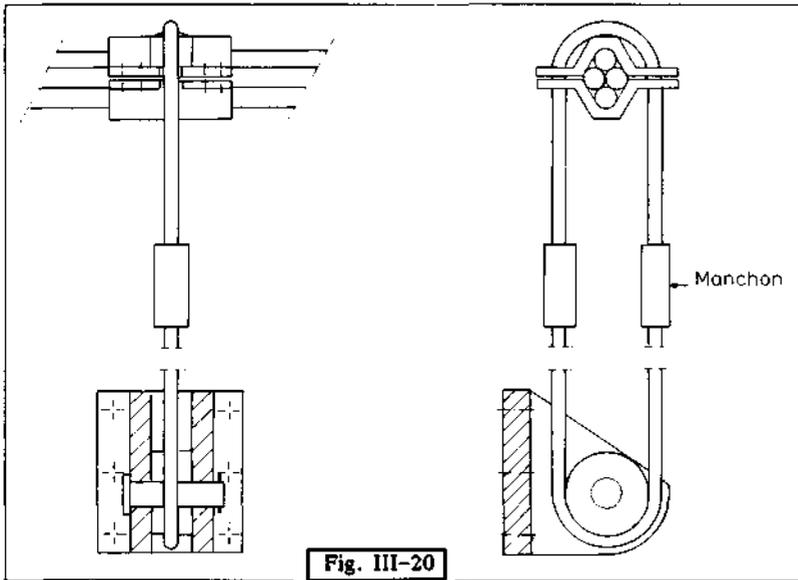
Dans le cas de suspentes à deux brins, les deux culots bas des câbles sont souvent repris par un support d'accrochage, lui-même relié au tablier par deux tirants de réglage (fig. III-17). Ce système favorisant la rétention d'eau au niveau des entrées de culots provoque la corrosion rapide des bas de suspentes.

Attaches des suspentes en barre

Dans de nombreux cas, la liaison entre la suspente et le tablier s'effectue par l'intermédiaire d'une chape fixée à la partie supérieure de la poutre de rigidité (fig. III-23). Bien que ne présentant des possibilités de débattement que dans un seul plan, ce système se comporte généralement de façon satisfaisante.

On rencontre également fréquemment un dispositif constitué d'une pièce d'attache faisant partie intégrante du tablier ; cette pièce d'attache est munie d'un orifice tronconique dirigé vers le haut. L'attache de la suspente s'effectue grâce à un écrou hémisphérique faisant office de rotule (fig. III-24). Ce système permet en principe une bonne articulation de la suspente, éliminant ainsi tout moment de flexion parasite, cela sous réserve d'éviter l'obstruction du tronc de cône, ce qui peut théoriquement être réalisé à l'aide d'un masticage par un produit souple et stable dans le temps. En pratique, l'expérience montre que les produits utilisés durcissent et fissurent, ne remplissant plus ainsi leur fonction.

Sur certains ouvrages comportant des suspentes à double barre, l'ancrage inférieur se fait sur une pièce massive sur laquelle s'articule le bas de la suspente (fig. III-20) ; les foyers de corrosion sont alors pratiquement inexistantes.



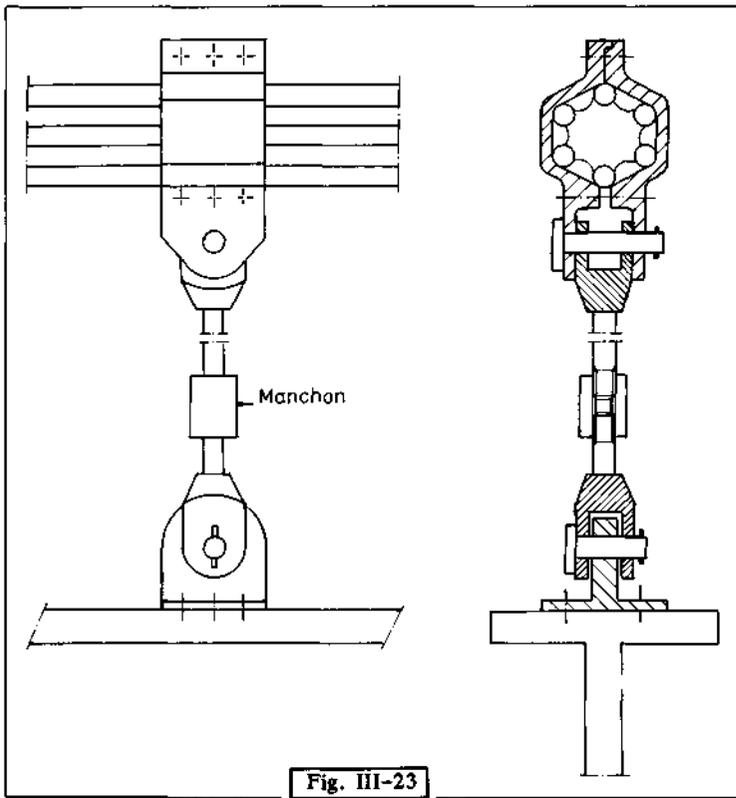


Fig. III-23

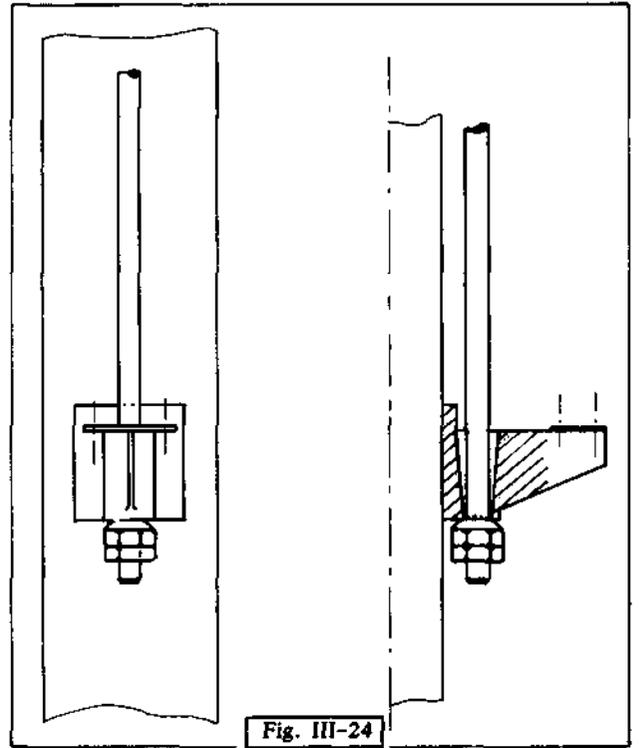


Fig. III-24

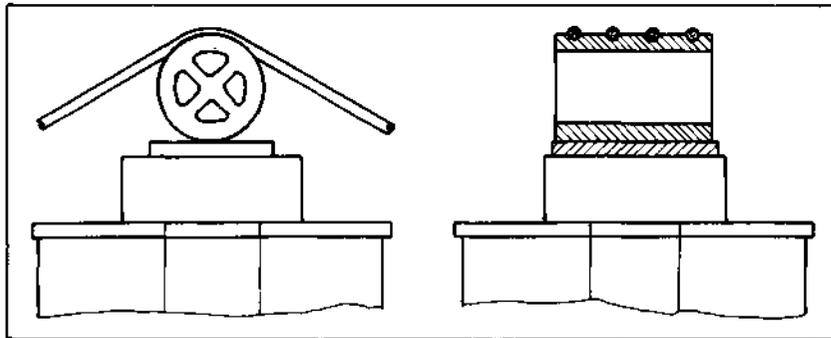
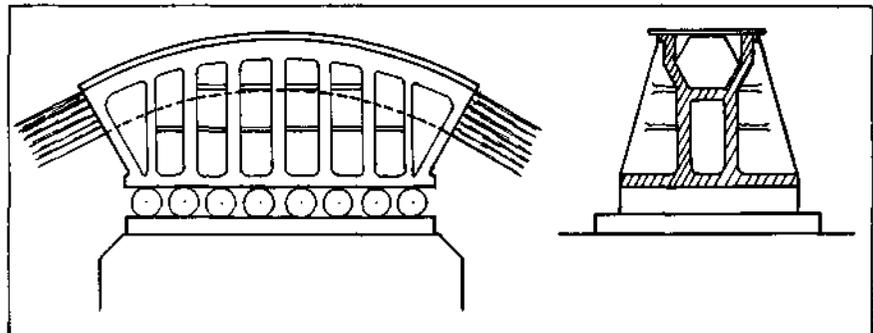


Fig. III-25

Fig. III-26



Le meilleur système d'attache est réalisé par l'intermédiaire d'un cardan au niveau de la membrure supérieure de la poutre de rigidité : solution qui présente l'inconvénient d'être onéreuse.

III-6.5 - Selles d'inflexion

Lorsque le tracé d'une nappe ou d'un faisceau subit un changement de direction au sommet des pylônes, il est nécessaire de prévoir une pièce dite "selle d'inflexion" qui permet de reprendre l'effort radial amené par les câbles. Cette pièce doit en outre présenter une forme telle qu'elle évite toute blessure ou déformation préjudiciable aux câbles.

Dans de nombreux cas (pylônes rigides), les selles d'inflexion doivent permettre un déplacement longitudinal de la nappe ou du faisceau. Pour ce faire, elles sont le plus souvent montées sur rouleaux. Simples cylindres en fonte à l'origine (fig. III-25) elles sont actuellement réalisées en acier moulé (fig. III-26).

Bien souvent, le rayon de courbure est trop faible, ce qui engendre des déformations, des détournages de câbles et des contraintes parasites importantes.

Par ailleurs, les déplacements longitudinaux sous circulation étant, le plus souvent, de faible amplitude, de nombreux phénomènes de blocage ont été constatés, provoqués par la corrosion des rouleaux et des plaques de roulement. Aussi, à l'occasion de remplacements, des rouleaux et des plaques en acier inoxydable ont-ils été récemment mis en oeuvre.

III-6.6 - Selles d'infléchissement et colliers d'épanouissement

Dans le cas où la suspension est constituée de câbles groupés en faisceau ou en couronne, l'entrée dans les chambres d'ancrages et l'épanouissement nécessaire à l'ancrage individuel de chaque câble entraînent la présence d'un collier d'épanouissement (fig. III-27), souvent précédé d'une selle d'infléchissement ; parfois ces deux organes sont confondus.

Bien qu'inévitable, cette disposition présente de nombreux inconvénients :

- elle favorise la rétention d'eau au contact des câbles ;
- elle rend pratiquement impossible le réglage des tensions entre les divers câbles élémentaires.

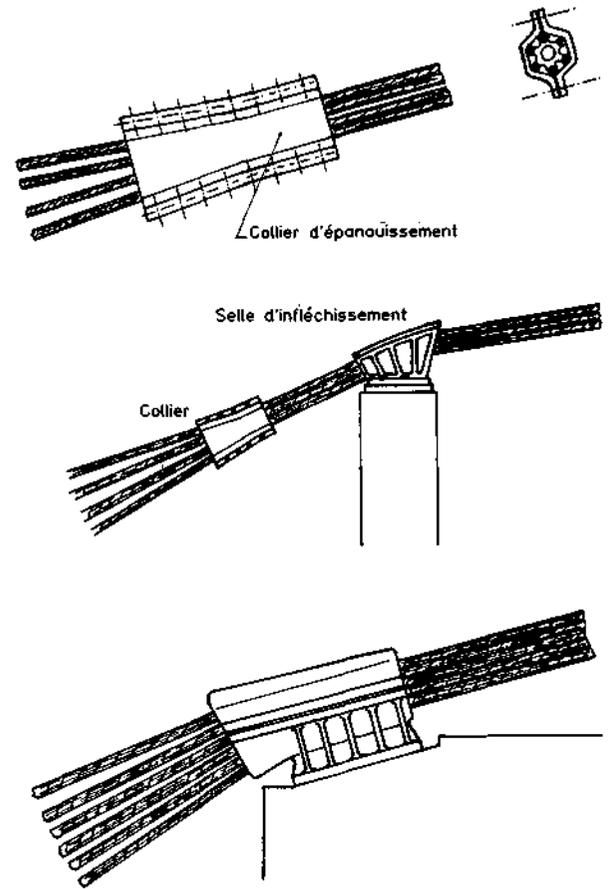


Fig. III-27

Enfin, l'ouverture d'un collier d'épanouissement est une opération délicate et parfois dangereuse.

III-7 - RÉGLAGE D'UNE SUSPENSION

III-7.1 - Hypothèses de base

Un pont suspendu étant défini par des caractéristiques géométriques (profil en long du tablier, distance entre pylônes, hauteur des pylônes, flèche des câbles porteurs), les vérifications sont conduites, ainsi qu'il est indiqué au chapitre II, à partir des hypothèses de calcul suivantes :

- les tensions sont égales dans chaque câble élémentaire constitutif des faisceaux ou des nappes ;
- les tensions sont égales dans les suspentes ;
- les poutres de rigidité ne sont soumises à aucune sollicitation (M et $T = 0$) pour une température de réglage de référence ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$ en général) ;
- la composante horizontale de la tension dans les câbles est supposée constante d'un bout à l'autre de ceux-ci. Cela implique que les câbles se déplacent

librement dans un plan horizontal au sommet des pylônes (soit par le jeu des selles d'appui, soit par l'inclinaison des pylônes articulés). Cependant, dans certains types de structures, il doit être tenu compte de la flexibilité des pylônes (ponts de Tan-carville et de Bordeaux par exemple) ;

– l'élasticité des suspentes est négligée vis-à-vis des déformations des câbles porteurs.

Sur ces bases, le calcul permet de préciser :

– la longueur et le tracé théorique des câbles entre les ancrages ;

– la longueur de chaque suspente ;

– les tensions sous charge permanente, dans les câbles et les suspentes.

En théorie, l'opération de réglage est donc une opération simple puisque, les longueurs des câbles et des suspentes étant fixées, il suffirait d'appliquer à chaque élément la tension déterminée par le calcul pour obtenir le profil en long du tablier défini au départ. En pratique, il en est tout autrement compte tenu d'un certain nombre de facteurs technologiques tels que l'incertitude sur le module réel des câbles ou, de façon plus évidente, le fait que toutes les opérations ne peuvent être simultanées ce qui implique de procéder par approximations successives, ou que la température ne reste pas constante tout au long de l'opération de construction.

III-7.2 - Réglage d'un ouvrage en construction

Chronologie

Les opérations successives sont les suivantes :

1 – Pose des câbles porteurs et réglage de leur longueur pour mise à la flèche théorique sous poids propre de chaque câble.

2 – Mise en faisceau ou en nappe des câbles avec pose des colliers.

3 – Mise en place des suspentes et construction du tablier suivant un processus qui doit être étudié dans le détail.

4 – Les précisions d'usinage et de montage ne permettant pas de réaliser rigoureusement ce qui est prévu par le calcul, il est nécessaire de procéder à un réglage complémentaire :

a) un premier réglage général de la longueur des suspentes permettant d'obtenir le profil en long théorique du tablier : le contrôle de cette opération

se fait par visées optiques. Il doit être tenu compte, évidemment, de la température à ce moment ;

b) le réglage (par vérinage) des câbles élémentaires de retenue de manière à égaliser leurs tensions ;

c) un réglage fin qui consiste à contrôler la tension de chaque suspente par vérinage : on vérifie qu'à ce stade les ajustements à effectuer sont peu importants.

Une méthode indirecte, quelquefois utilisée pour contrôler la tension de chaque suspente, consiste à apprécier la "creusure" des câbles porteurs (fig. III-28).

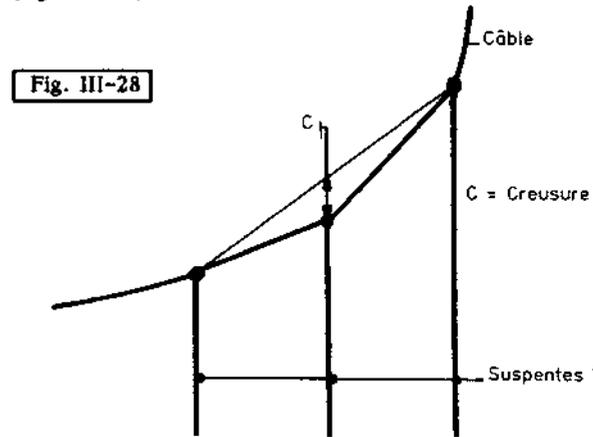


Fig. III-28

Moyens de mesure

Pour le réglage d'un pont suspendu, on dispose de deux types de moyens de mesure :

1– les mesures de longueur (longueur du câble ou des suspentes, flèche de la parabole des câbles) ;

2– les mesures de force par vérinage (tension dans les suspentes par exemple).

Selon le cas, il y a intérêt à utiliser l'une ou l'autre de ces méthodes.

La flèche d'un câble parabolique est un moyen extrêmement sensible pour contrôler sa longueur et, par conséquent, sa tension. En effet, la longueur d'une parabole en fonction de la flèche f et de la corde l a pour expression :

$$L = l \left(1 + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l^2} - \frac{32}{5} \frac{f^4}{l^4} + \dots \right)$$

Une variation de longueur dL provoque une variation de flèche :

$$df = \frac{15l^3}{80fl^2 - 384f^3} dL$$

Pour un câble dont la flèche est égale à $1/10$ e de la corde, on voit que la variation de flèche est égale au double de la variation de longueur ; ainsi, pour un câble de 80 m de corde et de 8 m de flèche, une variation de contrainte de 10 N/mm^2 provoque un allongement d'environ 0,5 cm et une variation de flèche de 1 cm, ce qui est très facilement mesurable avec les instruments de nivellement classiques.

Il faut noter, cependant, que la longueur du câble ne dépend pas seulement de sa tension, mais également de sa température moyenne qui n'est jamais connue avec précision.

Par contre, pour les câbles rectilignes et courts, tels que les câbles de retenue, les mesures de longueur sont d'une précision très insuffisante, surtout si les câbles sont bloqués dans un collier d'épanouissement à proximité des ancrages. Dans ce cas, il vaut mieux procéder par mesure de force au vérin, après avoir étalonné les manomètres ou, mieux, en utilisant des capteurs de pression.

Réglage des câbles

Le problème le plus délicat rencontré lors du réglage de l'ouvrage se situe vraisemblablement au niveau des câbles porteurs.

Il faut, au préalable, rappeler la "loi de comportement" d'un câble élémentaire :

Si l'on soumet un câble neuf (sortant de l'usine) à un premier cycle de traction, ce câble présente un module de déformation global E_0 .

Si l'on soumet ensuite ce même câble à des cycles successifs de traction, son module croît en fonction du nombre de cycles et tend à se stabiliser à une valeur E_u ; la différence entre E_0 et E_u peut atteindre 20 %. Cette variation de module s'accompagne d'un allongement rémanent.

Ce comportement, qui s'explique par le serrage progressif des fils constitutifs du câble, n'est pas absolument identique d'un câble à l'autre, même lorsqu'il s'agit d'une même fabrication. Il n'est pas non plus forcément constant le long d'un même câble (défauts locaux).

Il en résulte une double conséquence :

a) le calcul de la longueur des câbles est imprécis, puisqu'on ne connaît pas exactement le module réel de ces derniers ;

b) lors de l'assemblage sur faisceau, chaque câble a été au préalable réglé à la flèche théorique sous poids propre. On est obligé de bloquer les colliers,

donc les câbles entre eux, sous charge quasiment nulle : le taux de contrainte dans les câbles est alors très faible, ce qui ne permet pas d'éliminer complètement les irrégularités dues à leur raideur.

Le faisceau porte ensuite le tablier ; chaque câble porteur est alors soumis sensiblement à la même déformation (globale entre les ancrages, locale entre les colliers). Il est peu probable que le taux de travail soit le même pour tous les câbles, en raison non seulement des irrégularités initiales, mais aussi de la différence de leurs modules.

Le réglage entre colliers est généralement très difficile, voire impossible. En revanche, on peut effectuer un réglage des ancrages par vérinage. Eviter les surtensions dans la partie des câbles de retenue située entre le collier d'épanouissement et l'ancrage est important : il s'agit là d'une zone où il existe déjà des inégalités de tensions entre les fils d'un même câble (cf. § III-6.1c) et qui est particulièrement exposée à la corrosion, donc à la corrosion fissurante sous tension (les risques de corrosion sous tension sont, en effet, d'autant plus grands que le taux de contrainte dans l'acier est plus élevé).

Il est certain que les écarts de tension entre câbles sont nettement réduits lorsque ceux-ci sont livrés après avoir subi une mise en tension préalable jusqu'au voisinage de la charge de service. Cette

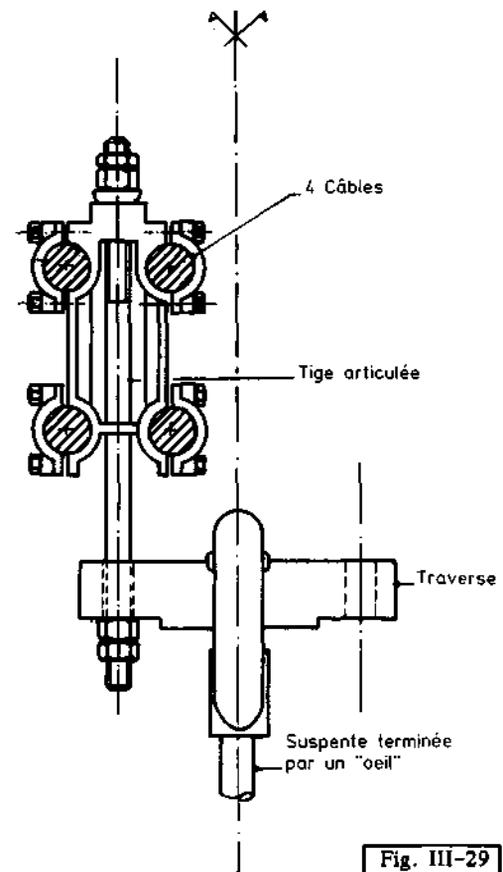


Fig. III-29

opération permet de plus un meilleur réglage initial par un calcul plus exact des longueurs et des flèches des câbles. La pré-tension est cependant peu utilisée, du moins en France, compte tenu des sujétions techniques et économiques qu'elle présente.

D'une manière générale, il y a intérêt à rechercher les dispositions constructives qui permettent de diminuer les inégalités de tension entre les câbles : colliers et selles permettant de libérer un câble, donc de modifier sa tension sans libérer les autres ; attaches de suspentes jouant le rôle d'un palonnier, pour égaliser les tensions entre deux groupes de câbles (fig. III-29).

Réglage des suspentes

Comme il a été dit ci-dessus, le réglage des suspentes doit être effectué en deux temps.

Dans un premier temps, on mesure la longueur des suspentes et leur verticalité de manière à obtenir un tracé de câble et un profil en long aussi voisins que possible du dessin théorique.

L'objectif premier étant d'obtenir des tensions correctes dans les suspentes plutôt que de corriger les irrégularités de profil en long du tablier dues aux tolérances d'usinage, on procède, dans un deuxième temps, à un réglage fin au vérin en utilisant, si possible, quatre postes de vérinage par nappe en partant des suspentes situées aux quarts de la portée et en se déplaçant symétriquement vers le centre et vers les rives.

Le réglage des suspentes ne présente pas de difficultés pratiques particulières ; encore faut-il avoir prévu des courses de réglage suffisantes (longueurs filetées). Une réserve de réglage doit être conservée pour les interventions ultérieures (cf. § III-8.3).

Un contrôle par sondage peut s'effectuer sur quelques suspentes au moyen de techniques de mesure fines : des jauges de déformation à fil résistant ont été quelquefois utilisées à cet effet.

III-7.3 - Évolution du réglage dans le temps

Le réglage d'un pont suspendu n'est pas une constante dans le temps et il importe de s'inquiéter périodiquement de son évolution.

Causes possibles d'un dérèglement

Une première cause de dérèglement provient de la variation du module de déformation des câbles porteurs, qui est fonction :

- du nombre de cycles de chargements, du moins pendant le jeune âge de l'ouvrage, comme nous l'avons vu plus haut ;

- du temps, par suite d'un "fluage" des câbles, dû également au serrage progressif des fils constitutifs.

Il s'agit là d'une cause "normale".

Les causes "accidentelles" peuvent être :

- un glissement des colliers ;

- un glissement des câbles dans les culots d'ancrages (soit des câbles porteurs, soit des suspentes si celles-ci sont constituées par des câbles) ;

- un mouvement au niveau des pylônes ou des massifs d'ancrage ;

- un blocage des selles mobiles.

Conséquences d'un dérèglement

Les conséquences directes, et qui peuvent être graves puisque la stabilité du tablier peut en être affectée, sont de deux sortes :

- soit qu'il s'agisse des câbles porteurs eux-mêmes, et cela au niveau des ancrages tout spécialement, où l'on risque un report d'effort sur un ou plusieurs câbles, pouvant aller jusqu'à la rupture du câble ;

- soit qu'il s'agisse des suspentes : il est évident qu'à une suspente trop molle correspondent une ou deux suspentes surtendues voisines ; le risque est alors une rupture de la suspente surtendue, le processus pouvant se propager de proche en proche.

Les conséquences indirectes sont sans doute moins graves puisqu'elles n'affectent que les équipements.

Un ouvrage mal réglé a un comportement dynamique anormal qui se traduit, en général, par des battements au niveau des appareils d'appui. Ces chocs répétés détériorent progressivement les appuis eux-mêmes, les joints de chaussée, le revêtement, la chape d'étanchéité, etc.

III-7.4 - Réglage d'un ouvrage en service

Symptômes d'un dérèglement de suspension

Les principaux moyens permettant de détecter un mauvais réglage sont les suivants :

a) le repérage de suspentes "molles" : un simple examen à la main permet de repérer une suspente détendue, les suspentes de rives étant généralement

les plus sensibles à ce phénomène, à cause de la proximité des appareils d'appui qui constituent un "point dur" ;

b) le nivellement du tablier et des câbles, qui permet de se faire une idée du réglage d'ensemble ; il faut absolument tenir compte de la température et il est prudent d'effectuer plusieurs mesures à des heures différentes, en notant la température à chaque fois ;

c) l'examen des culots permet de détecter des glissements du métal fusible (fig. III-30) ; des glissements différents d'un culot à un autre peuvent traduire, soit des différences de tension importantes lors de la construction, soit, le plus souvent, des défauts de remplissage qui ont provoqué un glissement et, par conséquent, une baisse de tension dans la câble correspondant.

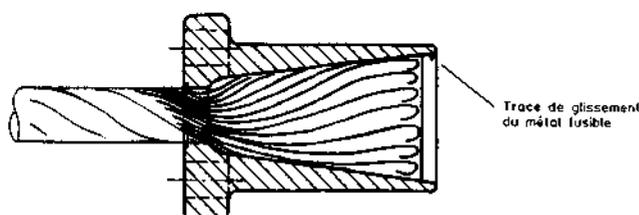


Fig. III-30

Ce phénomène est d'autant plus important que la longueur libre du câble est courte ; le cas le plus grave est constitué par les câbles jointifs en faisceau où la longueur libre entre collier d'épanouissement et culots est toujours très faible (de 3 à 5 m le plus souvent) ; dans un tel cas, un glissement d'ancrage de 1 cm sur un câble équivaut à une réduction de tension de 300 à 500 N/mm² ;

d) la détection du blocage des dispositifs de roulement des selles d'appui mobiles en tête de pylône qui signifie que les efforts dus aux surcharges et à la température sont repris en partie par le pylône et non par les câbles de retenue ; cela est d'autant plus vrai que le pylône est plus rigide (cas des pylônes en maçonnerie) ;

e) l'examen de l'état des appareils d'appui, qui est souvent symptomatique : un appareil d'appui détérioré est très souvent la conséquence d'une suspension dérégulée.

Les calculs

Toute opération de réglage doit être précédée d'un calcul complet indiquant les efforts dans les diverses parties de l'ensemble de la structure, au cours de chacune des phases du chantier.

Opérations de réglage

Les opérations de réglage sont plus ou moins faciles à effectuer selon l'état de l'ouvrage (tiges de suspentes dont la partie filetée est trop courte par exemple). Il ne faut donc pas hésiter à changer ou à modifier certaines pièces, de manière à permettre les réglages indispensables (remplacement des étriers de suspentes ou modification des dispositifs d'attache des câbles).

Les opérations de réglage sont les suivantes :

- le cas échéant, nettoyage et déblocage, ou éventuellement remplacement des dispositifs de roulement des selles en tête de pylône (ou des articulations en pied) ;
- démontage partiel ou total des appareils d'appui (selon leur type) ;
- vérification des tensions dans les câbles de retenue et réglage ;
- le cas échéant, vérification de la tension et réglage des haubans, des câbles de têtes et des câbles paraboliques (cas des ouvrages possédant des ancrages sur chariot mobile en tête de pylône) ;
- premier réglage des suspentes par mise à longueur, en fonction du profil en long et du tracé du câble théoriques ;
- vérification de la verticalité des suspentes ;
- réglage fin des suspentes par mesure au vérin ;
- le cas échéant, réglage fin des haubans et des câbles de tête ;
- réglage fin des câbles de retenue et, éventuellement, des câbles paraboliques ;
- réglage des appareils d'appui ou mise en place des nouveaux appareils, selon le cas.

III-7.5 - Nécessité du réglage

Outre les cas où la suspension est dérégulée, il convient de procéder à un réglage chaque fois que l'on apporte une modification quelconque à la structure (changement de suspentes, remplacement d'un platelage en bois par une dalle en béton armé ou par un platelage métallique, changement d'appareils d'appui, renforcement des poutres de rigidité, etc.).

Par ailleurs, tout changement de câbles doit être suivi d'au moins deux réglages : le premier à la fin du chantier, le deuxième après un an ou dix-huit mois de service, de façon à compenser, autant que faire se peut, les différences de tensions et les dérégulages engendrés par le "fluage" des câbles.

Il faut noter que tout remplacement partiel de câbles porteurs (un ou deux, par exemple) constitue une solution provisoire, compte tenu des différences de module existant, entre les câbles neufs et anciens, et qu'un tel dispositif implique des réglages fréquents (un par an pendant quatre ou cinq ans, par exemple), de manière à éviter que les câbles neufs ne se déchargent au détriment des anciens. Les câbles neufs doivent obligatoirement avoir subi une pré-tension en usine et, en tout état de cause, une telle réparation ne peut, en aucun cas, être considérée comme une véritable remise en état, le remplacement des câbles restants devant être prévu à court terme.

III-8 - CHANGEMENT DE SUSPENSION

III-8.1 - Généralités

Les câbles et les suspentes sont des organes essentiels à la bonne tenue d'un pont suspendu. Ce sont aussi des organes vulnérables parce qu'ils sont très sensibles à la corrosion et difficiles à protéger contre elle ; de plus, étant situés au-dessus du niveau de la chaussée, ils peuvent être soumis à des agressions extérieures (chocs de véhicules, vandalisme, etc.).

On peut donc être amené à remplacer tout ou partie d'une suspension. Nous n'envisagerons que le remplacement total des suspentes (les câbles principaux étant conservés) et le remplacement de l'ensemble des câbles principaux. En effet, le remplacement partiel des câbles principaux engendre, comme on l'a dit précédemment (cf. § III-7.5), des reports de charges anormaux sous l'effet de déformations différées et, sauf cas exceptionnel, cette solution doit être écartée ; le remplacement partiel des suspentes doit, dans la mesure du possible, être évité pour les suspentes en câbles, où les phénomènes sont analogues à ceux des câbles porteurs.

Nous évoquerons également une opération relativement fréquente qui consiste à recouper les câbles principaux et à reporter les culots d'ancrages à l'extérieur des chambres d'ancrages ; cet aménagement présente l'avantage, d'une part de mettre les ancrages dans une zone aérée et, d'autre part, d'éliminer les extrémités de câbles qui sont très souvent les plus oxydées.

III-8.2 - Changement des suspentes

C'est de loin l'opération la plus facile à réaliser. En général, on peut déposer une suspente, puis la

remplacer sans engendrer des contraintes trop élevées dans les poutres de rigidité du tablier. Dans certains ponts modernes possédant des poutres de rigidité de grande inertie, cette opération peut même, parfois, se faire sous circulation partielle. Il y a lieu, bien sûr, de vérifier les contraintes dans les poutres en utilisant des méthodes simplifiées (on peut admettre que la poutre de rigidité fonctionne comme une travée indépendante entre les deux suspentes adjacentes à celle qui a été déposée).

Dans un certain nombre de cas, cette technique n'est pas applicable :

- la poutre de rigidité ne permet pas de se passer de l'appui d'une suspente ;
- l'entr'axe des suspentes est trop grand, et la suppression d'une suspente peut engendrer des variations d'inflexion importantes dans les câbles porteurs.

Alors, il est nécessaire de prévoir, avant démontage de la suspente, la mise en place d'une suspente provisoire permettant de maintenir constante la distance entre le câble et le tablier.

Ces suspentes provisoires sont généralement constituées soit par des barres, soit par des câbles prenant directement appui sur les câbles porteurs de part et d'autre des colliers d'attaches, leur glissement longitudinal étant empêché par des mordaches. La figure III-31 donne un exemple d'un système de suspentes provisoires.

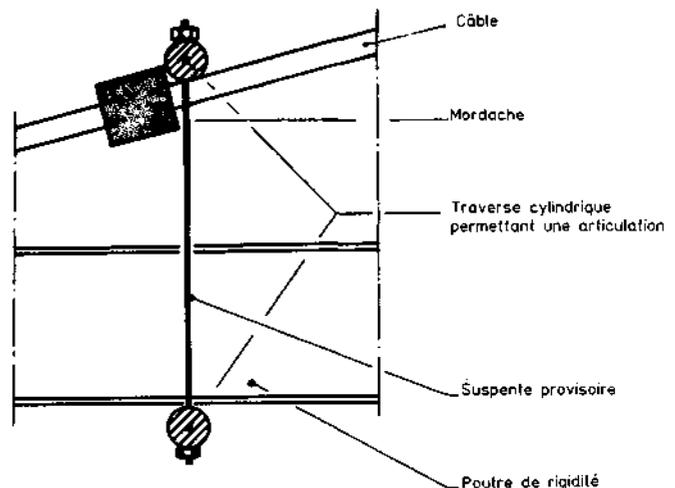


Fig. III-31

Une fois que l'ensemble des suspentes neuves est mis en place, il est nécessaire de procéder à un réglage de leur tension à l'aide de vérins étalonnés.

L'attention est attirée par le fait que l'utilisation de barres en aciers à hautes caractéristiques peut

entraîner quelques sujétions d'emploi : en effet, ces aciers de structure métallurgique fragile ne supportent pas d'efforts de flexion et toutes les dispositions doivent être prises pour éviter ces derniers lors des opérations de transfert de charge.

III-8.3 - Changement complet de la suspension

Trois techniques différentes peuvent être utilisées.

a) Changement de la suspension complète en une seule phase

Dans son principe, cette technique consiste à effectuer les opérations suivantes :

- Mettre en place des selles d'appuis neuves au-dessus ou à côté des selles d'appuis existant sur pylônes (les nouvelles selles étant mobiles par rapport aux anciennes) (fig. III-32a).
- Lancer un faisceau de câbles neufs prenant appui et bloqués, au moins provisoirement, sur les nouvelles selles (il est nécessaire de bloquer les câbles car, sous leur seul poids propre, le frottement n'est pas suffisant pour empêcher des dérapages intempestifs) (fig. III-32b).
- Amarrer les extrémités des câbles sur les tirants d'ancrages existants (après les avoir éventuellement prolongés par raboutage).
- Transférer les charges de l'ancien faisceau sur le nouveau en mettant en tension soit des suspentes provisoires, soit les nouvelles suspentes définitives, entre le tablier et le nouveau faisceau de câbles. Cette opération implique d'avoir au préalable libéré les appareils d'appuis sur culées et ne peut se faire que de façon progressive, sur les deux nappes à la fois et de façon symétrique (fig. III-32c).
- Bloquer éventuellement la nouvelle selle sur son pylône (cette opération n'a lieu que lorsque les pylônes sont articulés à leur base).
- Couper et démonter l'ancienne suspension (câbles et suspentes).
- Mettre en place, le cas échéant, les nouvelles suspentes définitives.
- Régler l'ensemble de la nouvelle suspension et recalcr l'ouvrage sur ses appareils d'appuis (fig. III-32d).

Remarques

La méthode décrite ci-dessus est celle qui a été utilisée pour le remplacement de la suspension du pont de Serrières (Isère).

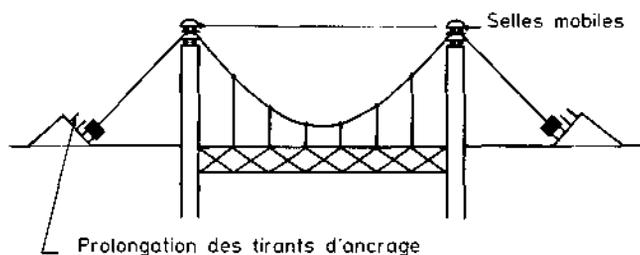


Fig. III-32a

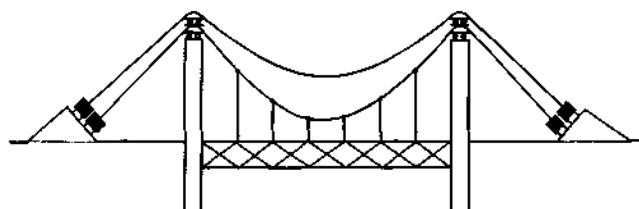


Fig. III-32b- Mise en place des nouveaux câbles.

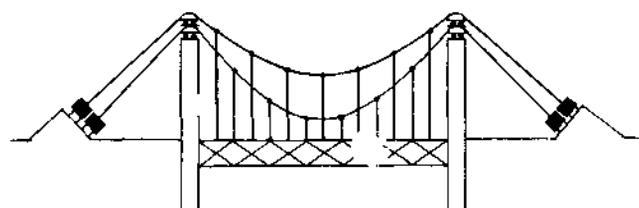


Fig. III-32c- Transfert des charges de l'ancienne à la nouvelle suspension par mise en tension de suspentes provisoires.

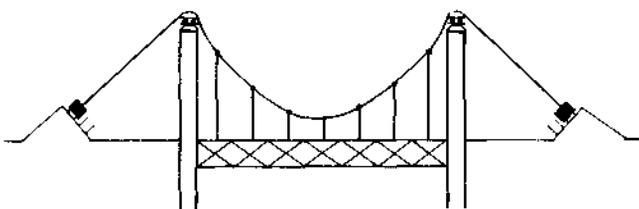


Fig. III-32d- Démontage de l'ancienne suspension. Mise en place des suspentes définitives, blocage des anciennes selles, réglage.

Sur d'autres ouvrages, la nouvelle selle n'a pas été rendue mobile par rapport à l'ancienne ; l'inconvénient de ce procédé est qu'on est obligé de maintenir les câbles de retenue au fur et à mesure que s'opère le transfert de charges ; dans le premier cas, en revanche, la mise en tension des câbles de retenue s'effectue simplement par le déplacement de la nouvelle selle sous l'effet des efforts apportés par le transfert de charges.

La figure III-33 donne, dans le cas du pont de Serrières, le schéma de la superposition des deux selles en tête de pylône ; l'ancienne selle étant fixe par rapport au pylône articulé en pied, la nouvelle étant mobile pendant les opérations de transfert de charges, puis bloquée par soudure en fin de transfert.

Le changement de la suspension en une seule phase présente les avantages et les inconvénients suivants :

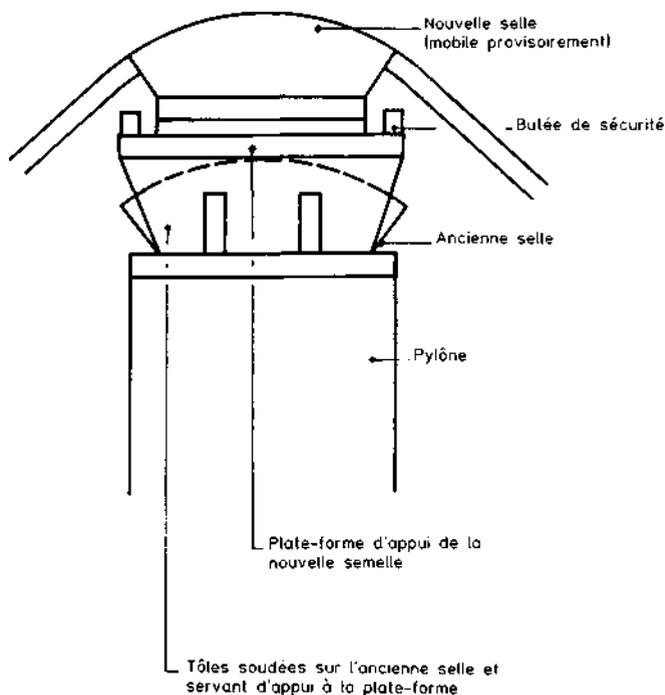


Fig. III-33

● **Avantages** : l'opération ne réduit, à aucun moment, le nombre de câbles supportant l'ouvrage, puisque l'on a simultanément deux suspensions complètes, soit superposées, soit juxtaposées.

Elle peut être utilisée quelle que soit la géométrie de l'ancienne suspension.

● **Inconvénients** : la présence simultanée de deux suspensions pose des problèmes technologiques assez difficiles à résoudre, en particulier au niveau des attaches dans les chambres d'ancrages et au niveau de la coexistence simultanée de deux selles d'inflexion en tête de pylône.

Elle nécessite la mise en oeuvre de deux jeux de selles et de colliers et elle impose, également, une légère modification de la géométrie des câbles porteurs, puisque le passage des câbles au sommet de pylône est forcément décalé, soit en hauteur, soit en plan.

b) *Changement câble par câble*

Dans certains cas, il est possible de remplacer les câbles principaux un par un. Dans son principe, la méthode consiste :

- à libérer de tous ses colliers, des selles d'appuis et de ses ancrages un des câbles de la suspension, à le démonter et à l'évacuer (fig. III-34a) ;

- à mettre en place un nouveau câble, bloqué au moins provisoirement sur ses selles d'inflexions ;

- à l'aide d'un système de vérins et d'attaches

provisoire, à mettre en place le nouveau câble dans les colliers de l'ancien. Simultanément, à mettre en tension ce câble, côté retenue, de manière à égaliser les tensions de part et d'autre du pylône et à éviter tout dérapage des selles d'inflexions (ou tout effort de torsion dans le cas de pylônes articulés à leur base) (fig. III-34b) ;

- à recommencer la même opération pour tous les autres câbles de la suspension ;

- à procéder à un réglage des tensions des suspentes et des câbles de retenue (fig. III-34c).

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

- il faut que la géométrie du faisceau existant permette de libérer un câble sur toute sa longueur, sans avoir à toucher à aucun des autres (c'est généralement le cas des ouvrages antérieurs à 1920 - 1930) ;

- il faut que le nombre de câbles soit suffisant pour que le poids propre de l'ouvrage puisse continuer à être supporté par une nappe réduite d'une unité, et cela compte tenu de l'état éventuel d'oxydation de cette nappe.

La méthode présente les avantages et les inconvénients suivants :

● **Avantages** : la méthode est relativement simple à mettre en oeuvre et n'exige pas la fourniture de nouvelles selles et de nouveaux colliers. Elle permet de maintenir rigoureusement constante la géométrie du faisceau de câbles.

● **Inconvénients** : elle ne peut s'appliquer, comme il vient d'être dit, qu'à certains types d'ouvrages et exige que le nombre de câbles par nappe soit suffisant pour que l'on puisse en démonter un sans risque.

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

Enfin, la méthode impose que soient réalisés simultanément la mise en tension des câbles de retenue par vérins et les transferts de charges.

c) *Changement à l'aide d'une suspension auxiliaire*

Dans certains cas (en particulier pour maintenir constante la géométrie du faisceau de câbles), on peut être amené à utiliser une suspension auxiliaire provisoire. Cette technique est également utilisée lorsqu'à la suite d'un choc accidentel on est amené

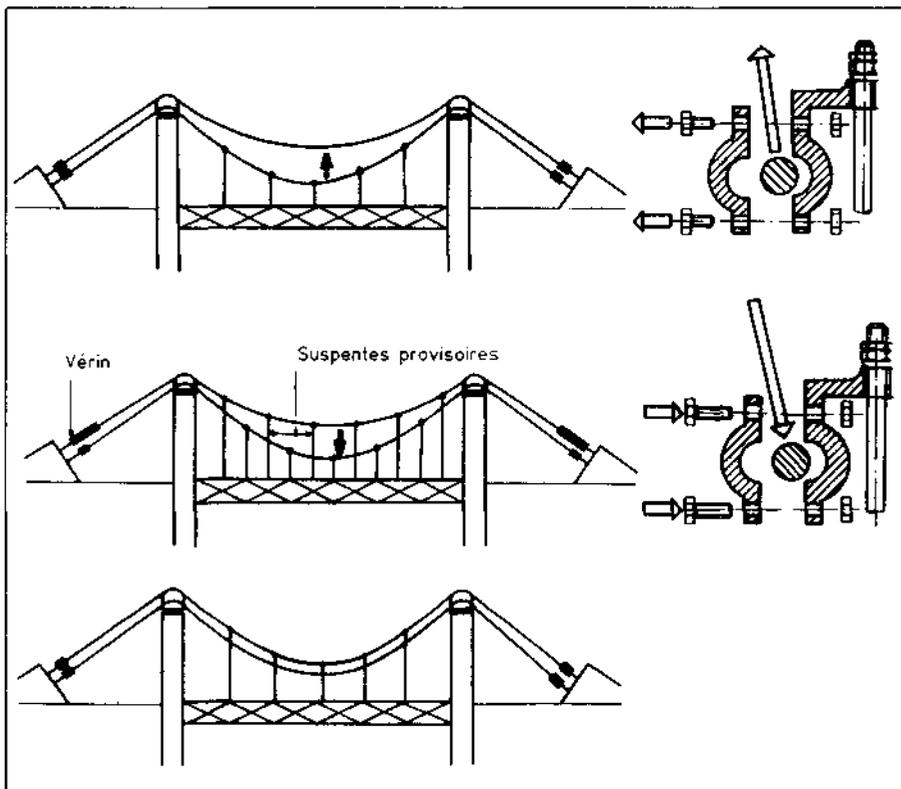


Fig. III-34a-
Démontage d'un câble.

Fig. III-34b-
Réglage général de la suspenste.

Fig. III-34c-
Mise en place du câble neuf.

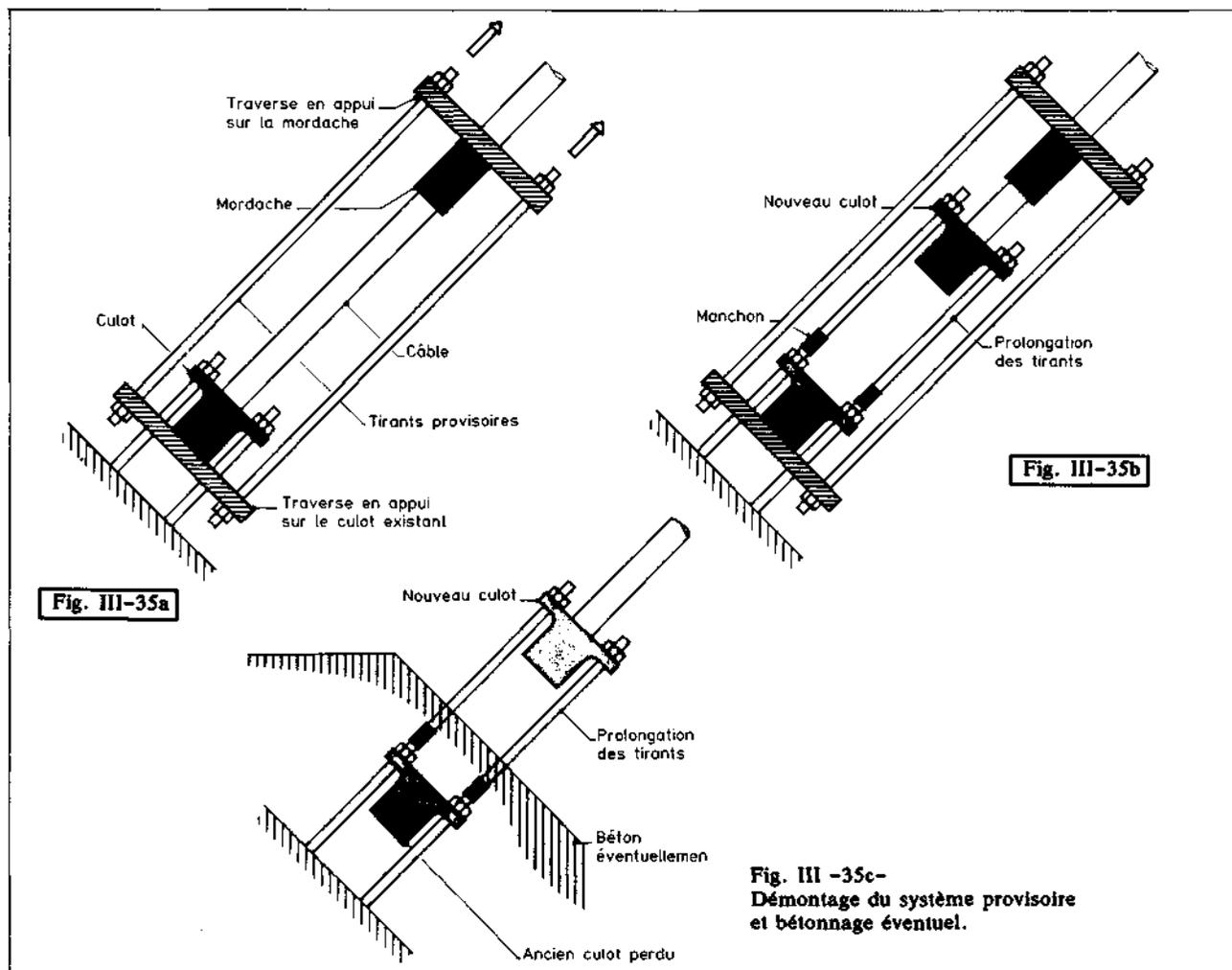


Fig. III-35a

Fig. III-35b

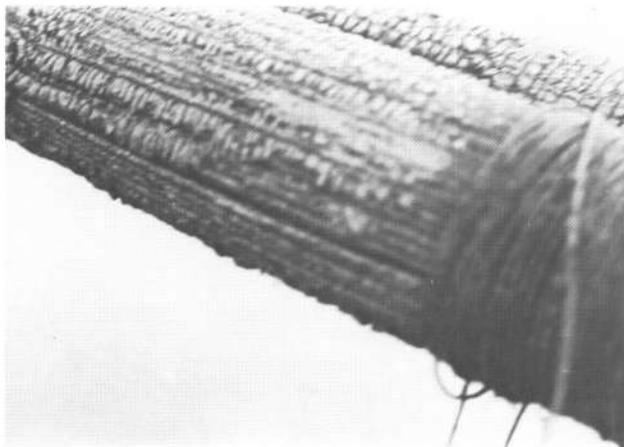
Fig. III -35c-
Démontage du système provisoire
et bétonnage éventuel.

à ne remplacer qu'un câble à la fois. Dans son principe, la technique consiste à répéter deux fois celle décrite au § a). Dans un premier temps, on transfère le poids de l'ouvrage sur des câbles provisoires disposés soit au-dessus, soit à côté des câbles existants, puis on transfère une seconde fois la charge, de la suspension provisoire à la suspension neuve définitive, mise à la place des anciens câbles.

III-8.4 – Mise à l'air libre des culots d'ancrages

De nombreux ouvrages ont leurs culots d'ancrages disposés dans des chambres le plus souvent souterraines. La zone des câbles située au voisinage des culots est alors soumise à une oxydation importante. Il est toujours intéressant de reporter les culots d'ancrages à l'air libre ; cette opération est, en effet, bénéfique à deux points de vue :

- a) elle place les culots et les abouts de câbles en zone aérée et, par voie de conséquence, beaucoup moins agressive ;
- b) elle permet de supprimer un tronçon de câble qui est généralement en très mauvais état.



Câbles à fils parallèles.

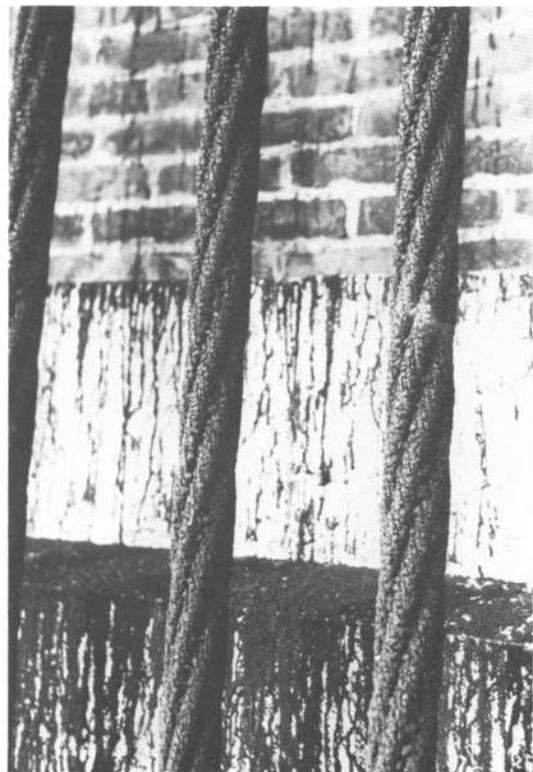
Dans son principe, la méthode consiste à "shunter" le culot d'ancrage en enserrant le câble dans des mordaches ; celles-ci reportent les efforts de traction sur des tirants qui viennent eux-mêmes s'amarrer sur les tirants d'ancrages existants.

Une fois ces barres provisoires mises en tension, on peut couper le câble, l'équiper de nouveaux culots, amarrer ces culots sur des prolongements des tirants d'ancrages, libérer les barres provisoires, puis bétonner les chambres d'ancrages.

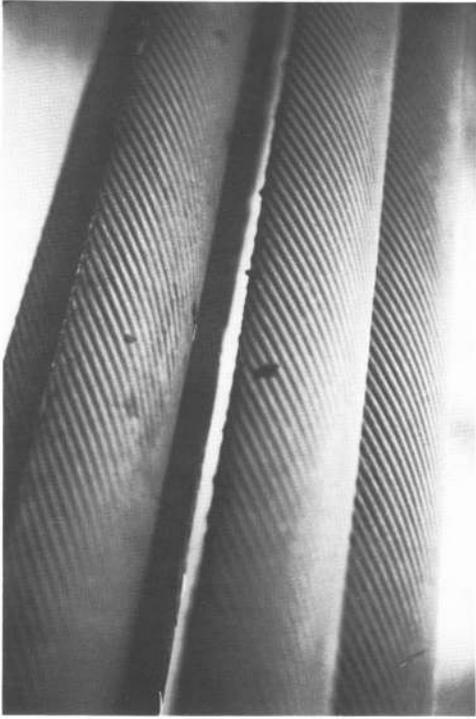
Les figures III-35 a, b, c, schématisent le déroulement des opérations.

III-8.5 – Conclusion

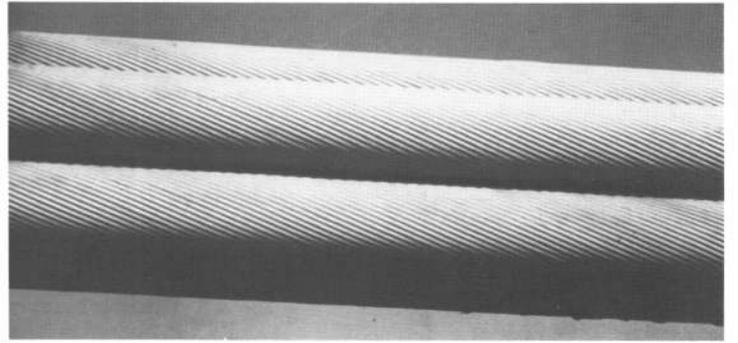
Toutes ces méthodes, qui peuvent apparaître simples dans leur principe, se heurtent, dans la réalité, à de nombreuses difficultés d'ordre technologique. L'énorme diversité des ponts suspendus existants fait qu'une méthode utilisée sur un ouvrage ne peut jamais être reproduite *in extenso* sur un autre. C'est pourquoi il nous paraît nécessaire, avant tout remplacement de suspension (même partiel), de réaliser une étude détaillée et de faire appel à un service spécialisé (SÉTRA – LCPC – CETE).



Câbles torsadés.



Câbles toronnés non clos disposés en couronne.



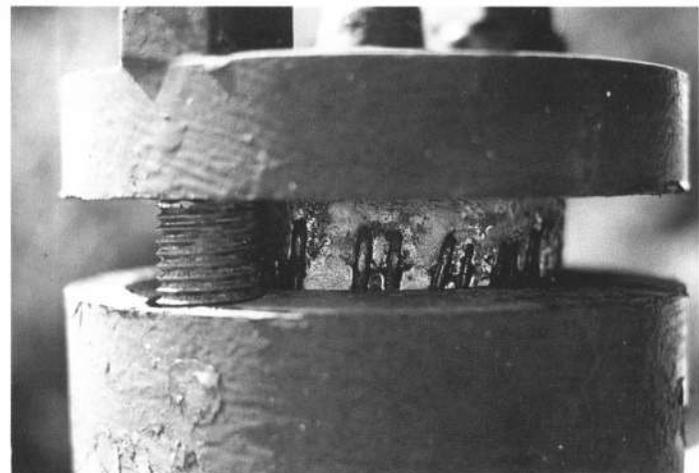
Câbles toronnés non clos disposés en faisceau.



Mauvais remplissage de culot.



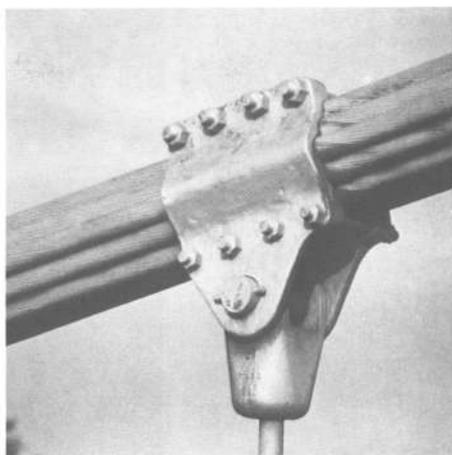
Culottage de câbles.



Culots spéciaux.



Suspentes en fer forgé.

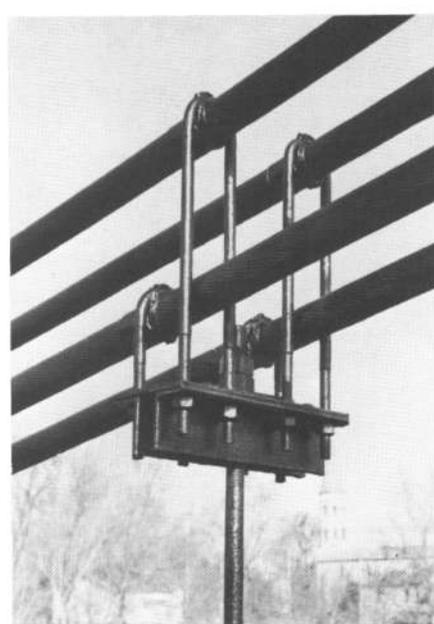
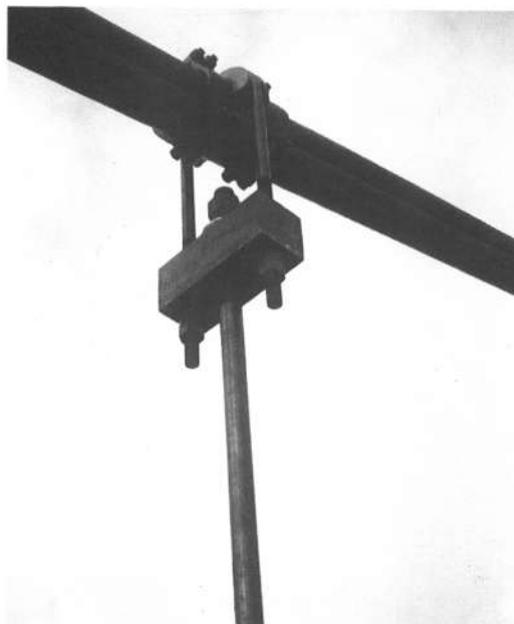
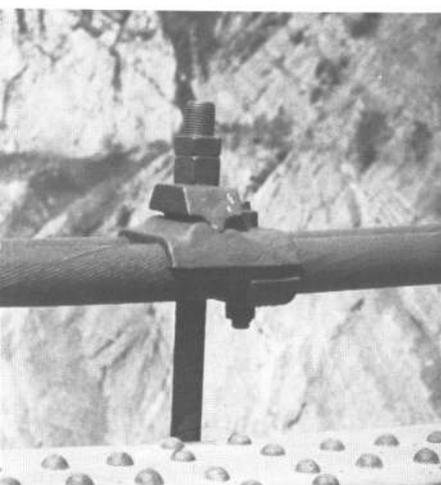
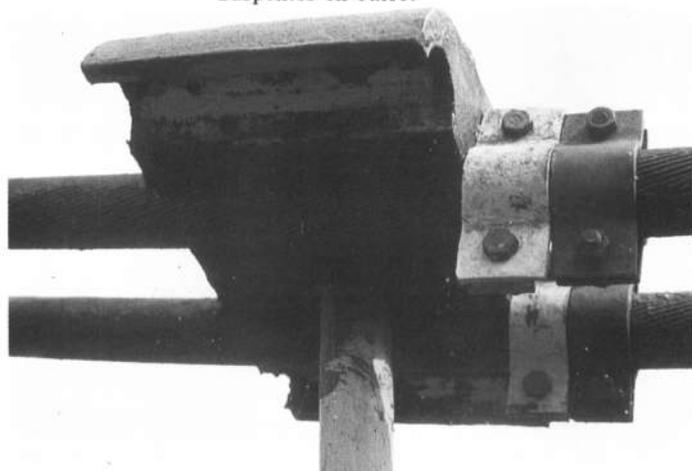


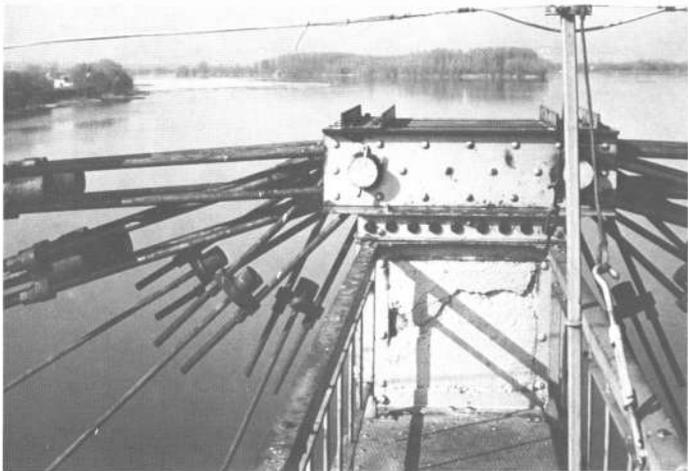
Suspentes en câbles (1 brin).



Suspentes en câbles (2 brins).

Suspentes en barre.





Chariot en tête de pylône.



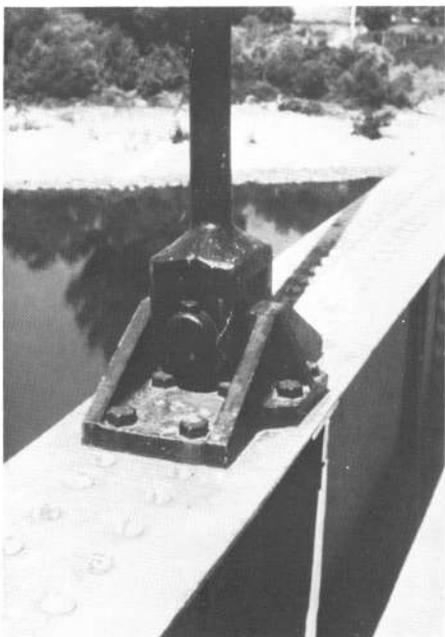
Rouleaux sous chariot en tête de pylône.



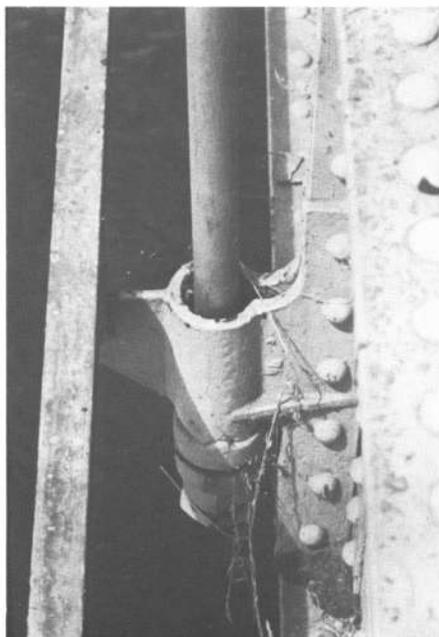
Suspentes en câbles.



Suspente en câble.



Suspentes en barre.

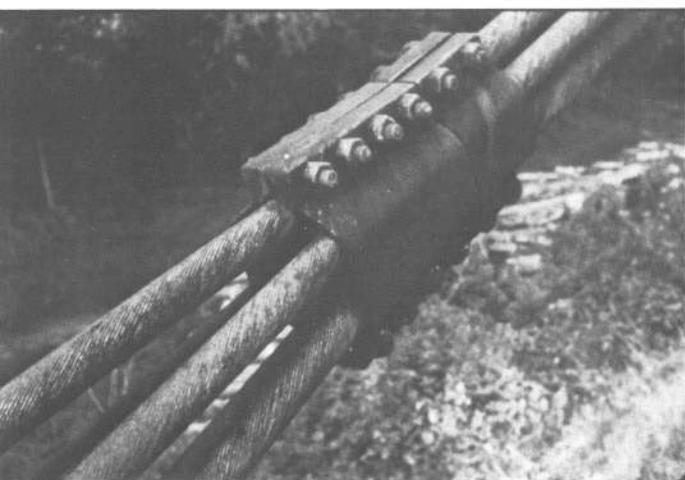




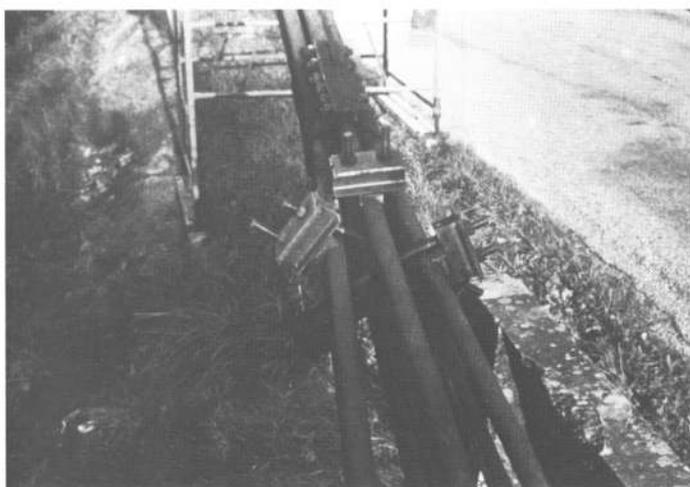
Selles d'infléchissement.



Infléchissement et collier d'épanouissement.

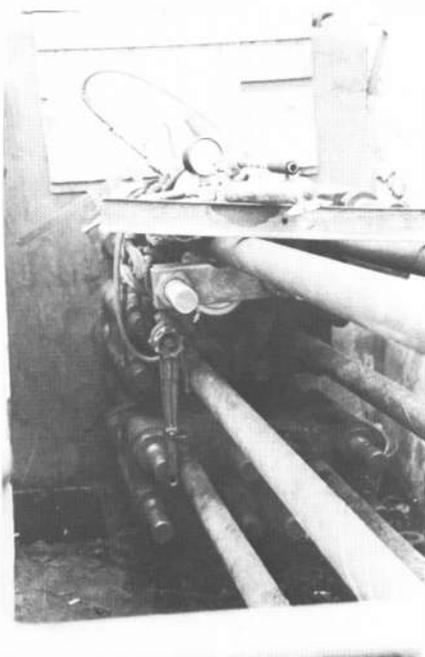
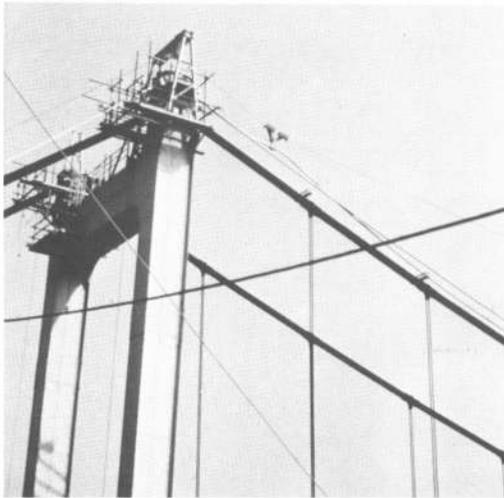


Collier d'épanouissement.

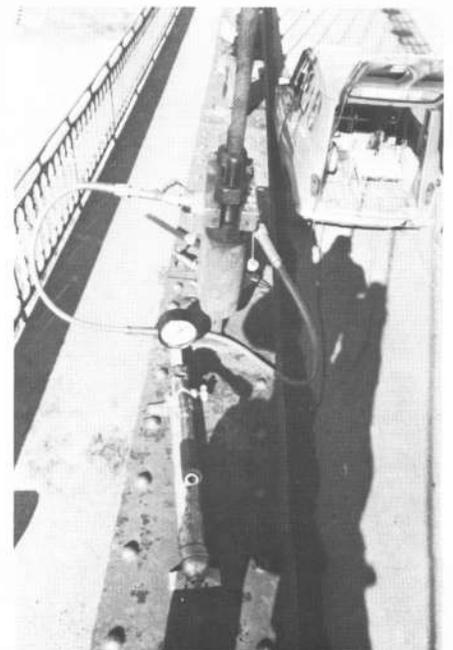


Ouverture d'un collier d'épanouissement.

Changement de suspension.



Mesure de tension
des câbles porteurs.



Mesure de tension
des suspentes.

CHAPITRE IV

INFRASTRUCTURE DES PONTS SUSPENDUS

IV-1- INTRODUCTION

L'infrastructure des ponts suspendus comporte essentiellement des culées, des piles et des pylônes, ainsi que des massifs et des chambres d'ancrages.

Les piles et les culées ne diffèrent pas fondamentalement de leurs homonymes pour ouvrages non suspendus, mais leur fonctionnement peut être différent.

Les pylônes sont un élément spécifique dont la fonction principale est de transmettre aux appuis la réaction verticale des câbles.

De même, les massifs et chambres d'ancrages qui doivent reprendre la réaction oblique des câbles.

Schématiquement, dans la majorité des ponts suspendus existants, on peut distinguer deux types de dispositions :

1 - *la travée suspendue couvre la longueur de la brèche* : dans ce cas, les pylônes sont situés sur les culées et les massifs ou les chambres d'ancrages peuvent, soit faire partie intégrante de ces dernières, soit être reportés assez loin en arrière dans les terres. Les culées sont alors soumises principalement à la réaction verticale de la suspension et, suivant le type de pylône, à des sollicitations secondaires correspondant aux déplacements longitudinaux des câbles (fig. IV-1) ;

2 - *la travée suspendue ne couvre pas toute la longueur de la brèche* : les pylônes sont alors situés sur des piles en rivière qui supportent donc la réaction de la suspension, les culées assurant le rôle de massif d'ancrage. Ces dernières sont alors soumises principalement à un moment de renversement dû à l'effort de tension dans les câbles de retenue et à la réaction d'appui, relativement faible, de travées latérales en général non suspendues (fig. IV-2).

Les piles, quand il en existe, sont surmontées de pylônes et sont soumises à la réaction verticale de la suspension et aux sollicitations secondaires déjà

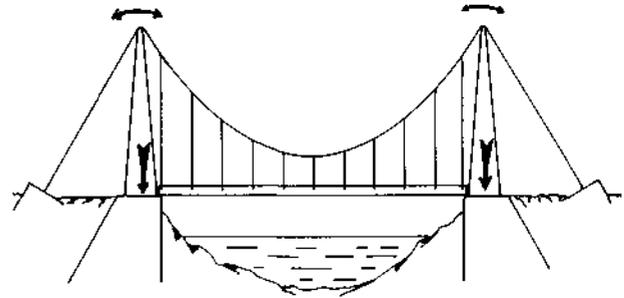


Fig. IV-1

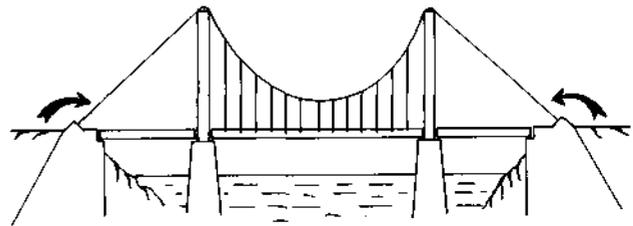


Fig. IV-2

citées. C'est le cas du deuxième type de dispositions et des ouvrages suspendus à plusieurs travées.

Une place à part doit être réservée aux ponts auto-ancrés où les culées peuvent être soumises à une réaction verticale négative, et aux ponts modernes dont les travées latérales suspendues réduisent notablement les efforts dans les massifs d'ancrages.

IV-2- LES FONDATIONS, PILES ET CULÉES

On conçoit que pour ces éléments d'infrastructure le bon comportement des fondations soit capital ; l'appui doit être réalisé sur terrain résistant, directement ou par l'intermédiaire de parois moulées ou de pieux avec protection complémentaire éventuelle contre les affouillements, par palplanches ou enrochements.

Dans les anciens ouvrages, c'est cette protection qui constitue le principal risque de désordres. En effet, à la différence d'un tassement excessif de terrain

qui se serait produit dès l'origine, jusqu'à une position d'équilibre, l'affouillement peut être continu et lent jusqu'à une rupture brutale.

Il faut penser que la plupart des ouvrages construits avant 1880, l'ont été très souvent sur des fondations peu profondes et simplement sur les sables et graviers alluvionnaires à la profondeur qui pouvait être atteinte assez facilement avec des moyens rudimentaires, c'est-à-dire 1,50 à 2 m environ sous le niveau d'étiage de l'époque, et, parfois, après avoir constitué un îlot artificiel ayant peu de cohésion.

La fondation elle-même était coulée à l'intérieur d'un batardeau de palplanches en bois qui ne pouvaient être battues profondément. L'ensemble était protégé par des enrochements qui devaient être reconstitués ou rechargés après les crues. Parfois, le terrain était consolidé par un grand nombre de pieux de chêne ou d'acacia, d'assez faible diamètre, recouverts d'un plancher constitué de bois équarri et croisé, et destiné à recevoir la maçonnerie et à répartir la charge sur les pieux.

La majorité des anciens ponts, notamment sur le Rhône et sur la Loire, reposent sur des fondations de ce genre pour lesquelles il convient de surveiller et de reconstituer régulièrement la protection en enrochement.

Les fûts des piles jusqu'au niveau du tablier, de même que les murs en élévation des culées, ne présentent pas de problèmes particuliers, si ce n'est l'ancrage des appareils d'appui. Ces derniers subissent en effet des efforts alternés qu'ils transmettent à l'infrastructure, et la sous-estimation fréquente de l'effet dynamique de ces efforts conduit à des désorganisations importantes des appuis. Il ne faut donc pas hésiter à surdimensionner les organes et leurs ancrages dans la maçonnerie ou le béton, et à en assurer un entretien régulier.

D'une manière très générale, en plus des visites périodiques par hommes grenouilles, il est indispensable de surveiller l'aplomb ainsi que les fissurations et les épaufrures dans les maçonneries, qui peuvent être révélateurs d'une évolution dans la stabilité des appuis.

IV-3 - LES PYLÔNES

Les pylônes sont les organes d'appui des câbles. Une pile peut porter deux pylônes isolés portant chacun une nappe ou un faisceau de câbles.

Souvent, pour mieux supporter les efforts transversaux ou pour des raisons relevant de l'architecture, ils sont reliés par une ou plusieurs traverses et forment un portique. Ce portique est couramment appelé "pylône".

Le pylône transmet à la pile la réaction verticale des câbles et les sollicitations secondaires correspondant aux déplacements longitudinaux de ces derniers, ainsi qu'une part des efforts transversaux dus au vent.

La constitution des pylônes a évolué avec les matériaux de construction, maçonnerie à l'origine, puis fonte et fer, et maintenant acier ou béton armé.

Suivant la conception générale de l'ouvrage, les pylônes peuvent être :

- encastrés rigides, c'est-à-dire peu déformables ;
- encastrés flexible, volontairement déformables pour suivre le déplacement des câbles à leur sommet ;
- articulés à la base, pour suivre sans contrainte ces déplacements.

IV-3.1 - Pylônes encastrés rigides

Tous les pylônes en maçonnerie ont été conçus et considérés comme encastrés rigides. La majorité des pylônes en béton armé ou en acier sont conçus de la même manière.

Les câbles s'appuient au sommet de ces pylônes rigides par l'intermédiaire de dispositifs divers : rouleaux simples ou fléaux (remplaçant un rouleau de plus grand diamètre), chariots à galets multiples interposés entre une selle d'appui des câbles et la plaque de roulement, en fonte ou en acier, posée sur la maçonnerie. Ces dispositions permettent de minimiser les efforts horizontaux en tête des pylônes ; seule la résistance au déplacement des chariots (frottement) doit être absorbée par flexion.

Lorsque l'ouvrage est neuf et que les déplacements des chariots sont importants (c'est le cas au moment de la réception des ouvrages, où les charges d'épreuve sont supérieures à celle d'un trafic normal), le fonctionnement de ces organes est satisfaisant. Par la suite, du fait des faibles déplacements engendrés par les charges courantes, de la relative complexité de forme des chariots et de leur difficulté d'accès, les poussières s'accumulent, la corrosion s'installe, augmentant la résistance au roulement et les efforts horizontaux. Dans la limite de

faibles variations d'effort, les pylônes fléchissent un peu sans entraîner de désordres ; c'est le cas de nombreux pylônes qui présentent une certaine flexibilité.

Toutefois, il peut arriver que l'on assiste à un blocage complet des chariots, et les efforts engendrés par le fait que les déplacements des câbles sont impossibles produisent des désordres graves pouvant conduire à une rupture des pylônes à leur base. Cela est particulièrement vrai pour les pylônes intermédiaires des ponts à travées multiples et câbles de tête, où les mouvements des câbles sont importants.

Il est donc capital de surveiller de près les selles et les chariots en tête de pylônes et d'en assurer l'entretien par un nettoyage et un huilage périodique des organes de roulement, au besoin en pratiquant des soulèvements de selles à l'aide de vérins.

IV-3.2 - Pylônes encastrés flexibles

Ces pylônes sont toujours soit en acier, soit en béton armé. La différence avec les pylônes "encastrés rigides", est que leurs sections ont été dimensionnées et calculées pour que le mouvement maximal des câbles fixés au sommet sous les charges de calcul et les écarts de température, n'entraîne pas de contraintes excessives. Cela est d'autant plus facile que la hauteur fléchie est plus grande et peut être comptée jusqu'à la fondation (mais en tenant compte aussi des réactions au niveau du tablier).

Pour des facilités ou des économies au montage, l'appui des câbles est souvent réalisé pendant la construction sur des chariots à rouleaux permettant un grand déplacement, puis immobilisés par la suite.

En service, il convient de surveiller le comportement du béton, surtout dans les zones les plus sollicitées telles que les zones d'encastrement en pied de pylône.

Dans le cas des portiques, les deux montants, ou pylônes, peuvent être sollicités différemment en cas de surcharges dissymétriques. Cela provoque une torsion du portique et des flexions de la traverse supérieure. Il faut observer si de tels efforts n'ont pas produit de fissures dans une traverse trop rigide ou insuffisamment armée.

IV-3.3 - Pylônes articulés

Dans ce cas, l'appui à la base du pylône est articulé ; le pylône ne subit qu'un effort simple de

compression et peut être réalisé avec une section minimale économique.

Mais il faut aussi considérer le coût supplémentaire des articulations et de la sujétion d'un encastrement provisoire pendant la construction.

Les premiers pylônes de ce genre, qui étaient appelés colonnes ou fléaux, étaient constitués en bois, puis en fonte, et ensuite en acier et en béton armé.

Il existe encore d'anciens ouvrages avec des colonnes ou fuseaux en fonte relativement légers.

Dans ce type de pylône, il est nécessaire de veiller au bon comportement des articulations situées en pied, car la section des pylônes est, en règle générale, calculée au plus juste pour résister à la compression et aux phénomènes de flambement, à l'exclusion de tout effort de flexion. Si cela pose peu de problèmes pour les articulations métalliques en béton armé, l'imprécision sur la répartition des efforts concentrés dans la zone d'articulation risque de provoquer des éclatements du béton et une désorganisation de la zone d'appui.

IV-4 - LES MASSIFS ET CHAMBRES D'ANCRAGE

Hormis pour les ponts dits à "auto-ancrage" où les câbles sont ancrés directement sur le tablier qui supporte en compression la composante horizontale de leur tension, les autres types de ponts suspendus comportent des points d'ancrage situés soit sur les pylônes eux-mêmes, soit sur des massifs ou dans des chambres d'ancrage indépendants.

L'ancrage sur pylônes massifs a été adopté pour les ponts légers, comme les premiers ponts construits par Seguin de 1825 à 1840 ; ancrages dissymétriques pour les pylônes en rive (fig. IV-3), (passerelle de Tain-Tournon, pont d'Andance en Ardèche, etc.) et ancrages symétriques pour les ponts à deux travées (ponts sur la Saône). Dans ce cas, les pylônes supportent la composante horizontale de la réaction de la suspension et sont soumis à des efforts de flexion.

La solution la plus couramment retenue est celle des massifs ou chambres d'ancrage, dont la conception est fonction de la disposition de l'ouvrage lui-même, de la nature et de la résistance du terrain, des risques d'érosion par affouillement, notamment en cas de crues et de courants violents, voire de la disposition des constructions voisines.



Fig. IV-3

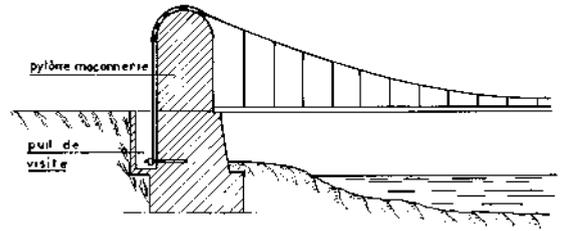


Fig. IV-5

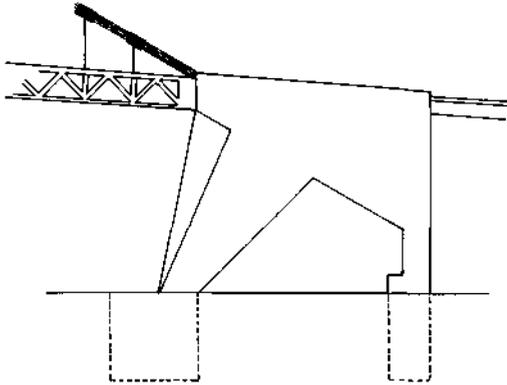


Fig. IV-4

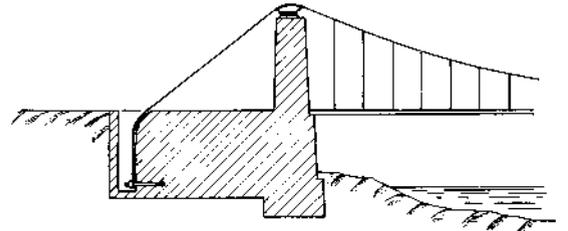


Fig. IV-6

Le massif d'ancrage, disposé à l'arrière des pylônes de rive, enterré ou en partie en élévation, s'impose de lui-même quand on ne dispose pas de terrain rocheux suffisamment dur pour y constituer un ancrage par tirants.

On peut citer comme exemple le massif d'ancrage rive gauche du pont de Tancarville, du type "chien assis" dont les "pattes" avant reposent sur des caissons havés allant chercher le bon sol à 19 m de profondeur (fig. IV-4). Toutefois, de nombreuses autres formules sont possibles, ainsi que le montrent les figures IV-5 à IV-7.

Ainsi, une formule couramment employée à la fin du siècle dernier était celle d'un massif de maçonnerie comportant une galerie semi-circulaire, servant d'appui aux câbles de retenue continus de l'amont à l'aval de l'ouvrage.

Les principaux problèmes posés par les ancrages de câbles sont de deux ordres :

- 1 - la stabilité du massif, quand l'ancrage n'est pas réalisé à l'aide de tirants noyés dans le rocher ;
- 2 - le comportement vis-à-vis de l'oxydation des câbles ou des organes de liaison des câbles aux massifs.

Stabilité des massifs

Le défaut de stabilité du massif est exceptionnel car, même si le calcul d'origine, par des hypothèses trop favorables de résistance au glissement, ne réservait pas une marge de sécurité importante,

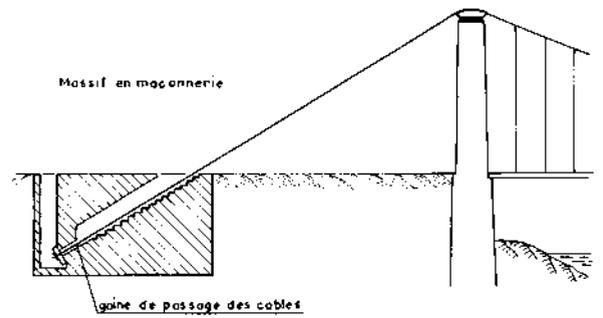


Fig. IV-7

cette sécurité s'accroît généralement avec le temps par le tassement du terrain et la mobilisation des frottements latéraux et de butée non pris en compte par les calculs.

Mais le risque d'instabilité peut venir du terrain lui-même. Le terrain d'assise peut être influencé par les eaux d'une forte crue et accuser à la décrue un léger tassement. En fait, le risque le plus réel est celui d'affouillement du terrain par une crue exceptionnelle.

Il faut surveiller sur ce point les massifs assis dans le lit ou en bordure du lit d'une rivière à régime violent ou torrentiel, si leur fondation n'est pas à une profondeur "garantie hors d'affouillement", ou si elle n'est pas protégée efficacement par un rideau de palplanches.

Liaison des câbles aux massifs

C'est le point qui nécessite le plus de surveillance et d'entretien. La forme et la disposition des organes de liaison dépendent de la constitution des câbles. Trois cas peuvent être considérés :

1 – appui sur la paroi d'une galerie semi-circulaire par l'intermédiaire de pièces moulées en forme de sellette ;

2 – ancrage à l'aide d'un culot retenu par des barres d'acier (tirants) noyées dans un massif de béton ou fixées à une plaque de retenue ; ces barres filetées comportent un écrou de butée qui permet le réglage de longueur ;

3 – ancrage individuel fil par fil : c'est la solution des câbles à fils parallèles utilisés de 1825 à 1875 et sur les grands ouvrages récents, oeuvres de constructeurs anglais ou américains ; dans ce cas, l'accrochage se fait par constitution d'une boucle sur une pièce d'acier comportant une gorge.

Les massifs des ponts construits au siècle dernier étaient constitués en maçonnerie hourdée au mortier de chaux. On n'osait pas, par crainte du risque d'oxydation, noyer des barres pour la reprise d'ancrage et l'accrochage des câbles devait être reporté à l'arrière du massif.

Dans le cas des figures IV-5 et IV-6, tous les organes d'ancrage restent assez accessibles à l'entretien ; dans le cas de la figure IV-7, la gaine de passage des câbles rend difficile l'examen et l'entretien : des poussières, terres ou immondices, s'accumulent, favorisant la retenue d'humidité et l'oxydation. De plus, ces ancrages en fond de puits sont fréquemment noyés lors de crues annuelles, et malgré un nettoyage après les crues, le manque d'aération et l'humidité de ruissellement et de condensation favorisent l'oxydation.

Beaucoup de ces ancrages ont été transformés en remplaçant la partie extrême des câbles par des étriers ou des barres de relais, et souvent l'attache des câbles a été reportée à l'extérieur après pose de barres enrobées dans le béton de remplissage des puits ou galeries. Il faut s'assurer, lors de ces reprises, que l'effort est bien appliqué sur une partie solide capable de répartir l'effort sur la maçonnerie.

Les massifs modernes construits en béton comportent, en général, l'accrochage des câbles à l'extérieur. L'extrémité des câbles et les organes d'ancrage sont bien aérés, et cela réduit beaucoup les risques ; mais cependant par l'orientation du câble, l'eau de suintement ou de condensation est retenue plus longtemps dans le câble à l'avant et, (partiellement) à l'intérieur du culot, s'il est imparfaitement rempli de métal fusible. L'oxydation peut alors se développer ; quand elle est localisée à l'extrémité des câbles, on peut envisager d'en couper les longueurs "malades" et reconstituer l'attache en rallongeant les tirants d'ancrage.

Mais l'accrochage extérieur des câbles de retenue n'est pas toujours possible ; ainsi, pour les ponts de grande portée, comportant un grand nombre de câbles, l'encombrement des ancrages peut imposer de disposer l'ensemble dans des chambres situées au-dessous du niveau de la chaussée. Il est alors nécessaire d'en favoriser l'aération et de prendre toutes dispositions pour assurer une bonne circulation et un bon renouvellement de l'air dans celles-ci.



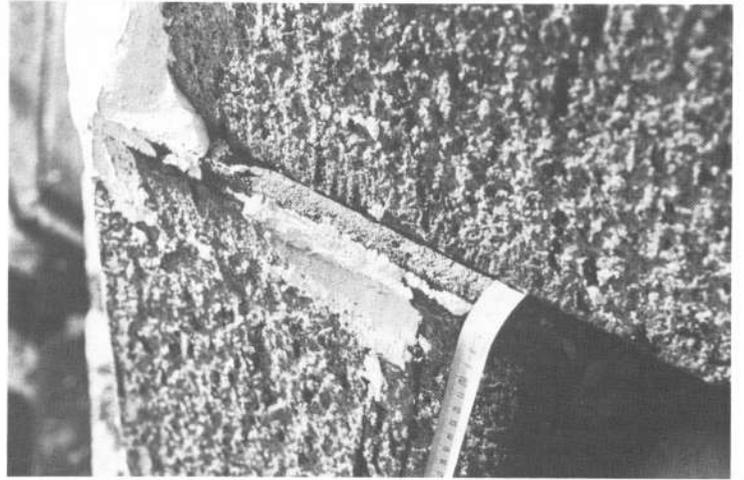
Fracture culée.



Massif d'ancrage.



Pylônes en maçonnerie.



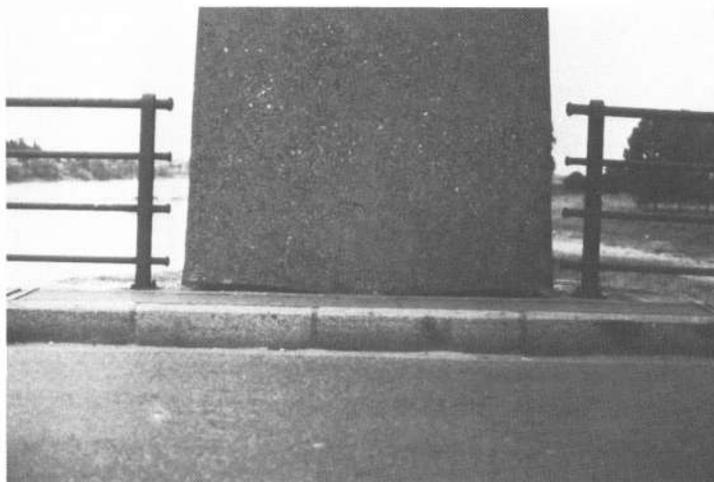
Rupture.



Pylônes articulés métalliques.



Pylônes flexibles en béton armé.



Pylône articulé en béton armé.

CHAPITRE V

TABLIERS DES PONTS SUSPENDUS

Les chapitres précédents traitaient d'éléments de structure spécifiques des ponts suspendus : la suspension et ses éléments adjoints, tels que les pylônes et les massifs d'ancrages.

Le présent chapitre traite d'un élément que l'on retrouve dans tous les ponts, mais on relèvera une différence fondamentale entre un tablier d'ouvrage classique, à poutres sous chaussée ou latérales par exemple, et un tablier d'ouvrage suspendu.

Dans le premier cas, en effet, le tablier assure à la fois une fonction de continuité de la voie portée et une fonction porteuse : il doit supporter son poids propre, les charges permanentes diverses et les charges roulantes.

Dans le second cas, la fonction porteuse est assurée par la suspension et le tablier remplit alors seulement les fonctions de continuité de la voie, de répartition et de transmission des charges.

V-1 - POUTRES DE RIGIDITÉ

Les poutres de rigidité exercent deux fonctions dans les ouvrages suspendus :

- une fonction de répartition longitudinale des charges entre les suspentes, et donc de limitation des déformations locales du tablier et des câbles ;
- une fonction de stabilisation de l'ouvrage sous les effets du vent, en limitant les déformations de flexion horizontale et de torsion.

Si leur efficacité dépend bien sûr de leur raideur, on peut préciser dès à présent qu'elle dépend également des dispositions constructives retenues, en particulier du mode de fixation aux pièces de pont. C'est pour cette raison que le classement proposé est établi en fonction de la constitution des poutres et de leur assemblage au reste de la structure.

V-1.1 - Ouvrages très anciens

Lors de la construction des ponts très anciens, la nécessité ne s'était pas fait sentir d'équiper les ouvrages de véritables poutres de rigidité.

Ces ouvrages n'étaient soumis qu'à des charges relativement faibles, si bien que, malgré la grande souplesse verticale de leur tablier, les déformations de ce dernier et des câbles étaient limitées. On ne pouvait pas compter sur une répartition longitudinale entre toutes les suspentes lorsqu'une charge concentrée, telle qu'un essieu, était appliquée sur le tablier.

De plus, le tablier ne pouvait résister par lui-même aux efforts transversaux créés par le vent et il n'était pas possible de réaliser un contreventement efficace. C'est pour cette raison que, bien souvent, dans les sites exposés, les ouvrages étaient équipés de câbles dits "câbles au vent" reliant en plusieurs points régulièrement espacés la partie inférieure du tablier aux culées. Ce dispositif permettait d'éviter les trop fortes oscillations du tablier ; mais leur effet pratique était d'éviter principalement le soulèvement du tablier, sous l'action de vents ascendants.

On se rend compte que dans de telles structures les suspentes ne peuvent accuser aucune faiblesse ou dégradation, alors même que le poids et la vitesse des charges routières augmentent. Aussi, lors de la visite d'un ouvrage suspendu à tablier sans poutre de rigidité, il convient d'être particulièrement strict sur le bon état de chacune des suspentes.

Il est bien évident d'autre part qu'un simple garde-corps ne peut être assimilé à une poutre de rigidité, quand il n'est constitué que d'éléments légers servant surtout à limiter la plate-forme d'un ouvrage pour éviter la chute des piétons. La raideur d'un garde-corps est insuffisante pour que soit assurée sa stabilité de forme sous un effort de compression, si

des joints de dilatation ne sont pas réalisés à intervalles réguliers ; c'est pourquoi sur les ponts très anciens, on voit souvent serpenter la lisse supérieure du garde-corps.

V-1.2 - Poutres à treillis

Poutres à treillis reposant sur les pièces de pont

Ces poutres sont composées de petits profilés (tés, cornières, plats). Leur membrure inférieure repose sur la membrure supérieure des pièces de pont, à laquelle elle est fixée par rivets ou boulons (fig.V-1). Dans la grande majorité des cas, l'assemblage est insuffisant pour réaliser un bon encastrement.

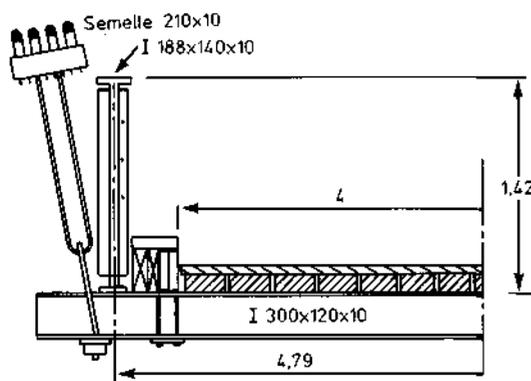


Fig. V-1- Pont d'Andance (Ardèche).

Pour assurer la stabilité de la poutre, la solution la plus couramment utilisée est de placer des contrefiches qui prennent appui sur la pièce de pont. Cependant, il convient d'être assez prudent sur l'évaluation de l'encastrement réalisé : avec le temps, les pièces s'usent et se désolidarisent légèrement. La membrure supérieure se déforme, la poutre ne peut plus remplir entièrement son rôle de répartition des charges et les suspentes sont davantage sollicitées.

Les déformations peuvent survenir brusquement à l'occasion du passage d'une trop forte charge. Il arrive aussi que la stabilité soit mise en cause par la détérioration accidentelle d'un des éléments constitutifs de la poutre (montants, diagonales) qui, rappelons-le, sont de section moyenne : ces poutres sont en effet très exposées aux chocs de véhicules.

L'implantation des contrefiches n'est pas aisée dans la partie centrale du tablier qui correspond au point bas de la suspension. Dans ce type d'ouvrage, les suspentes sont fixées aux extrémités des pièces de pont, à l'extérieur des poutres de rigidité ; les nappes de câbles empêchent donc la pose de contrefiches, dans les zones situées près de leur point

bas. Ailleurs, les contrefiches gênent la fixation des suspentes aux pièces de pont.

Pour permettre le passage des câbles, on constate que le palliatif employé est de cintrer la contrefiche. Celle-ci présente alors une efficacité très aléatoire et la stabilité de la poutre de rigidité peut être remise en cause.

La poutre "Arnodin"

La poutre "Arnodin", du nom de son constructeur, a reçu de nombreuses applications vers les années 1900. Dans sa version la plus évoluée, elle comprend des membrures et des montants en profilés métalliques, et des diagonales formées de ronds (fig.V-2). Les diagonales sont assemblées aux membrures et montants à l'aide d'axes. La membrure inférieure est fixée par boulons ou rivets sur la membrure supérieure de la pièce de pont. La membrure supérieure de la poutre peut être renforcée par des profilés (fer Zorès) qui donnent, de plus, l'apparence d'une main courante.

La poutre peut être habillée de différents motifs pour assurer la fonction de garde-corps.

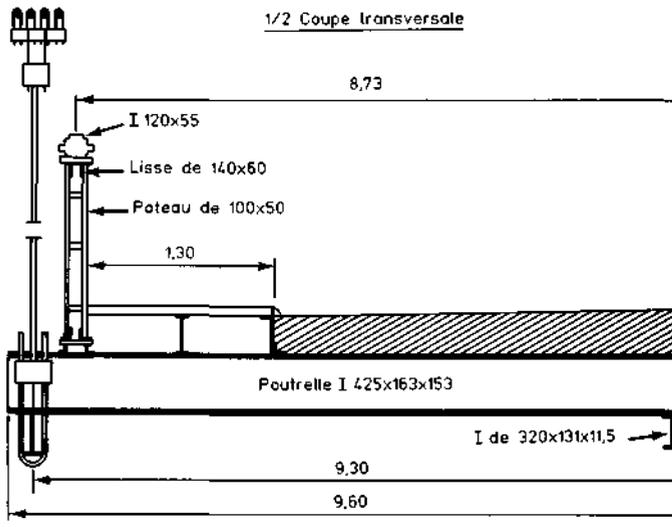
L'assemblage des poutres aux pièces de pont est renforcée parfois au moyen de contrefiches, implantées tous les trois ou quatre panneaux, au droit des montants. Malgré ce renforcement, on constate sur de nombreux ouvrages anciens que la membrure supérieure se déforme.

Ce défaut est en fait inhérent à la faible rigidité transversale de la membrure supérieure ; il peut être considérablement amplifié par un dérèglement de la suspension et le passage de trop fortes charges.

Poutres de grande section transversale, encastrees sur les pièces de pont

Différents types de triangulation sont utilisés. Le type "Warren sans montant" est en général réservé aux grands ouvrages, de plusieurs centaines de mètres de portée. Les membrures et les diagonales sont constituées de profilés de forte section ; pour les poutres les plus importantes, les membrures forment des caissons ouverts, et les diagonales des poutres-échelles. Les montants, lorsqu'ils existent, sont en double T.

Ces poutres, qui sont de dimensions relativement importantes, 2 à 5 m de hauteur, permettent de réaliser des assemblages efficaces avec les pièces de pont, ce qui assure à la fois une bonne stabilité de l'ensemble, une répartition satisfaisante des charges et un contreventement efficace (fig. V-3).



Elévation

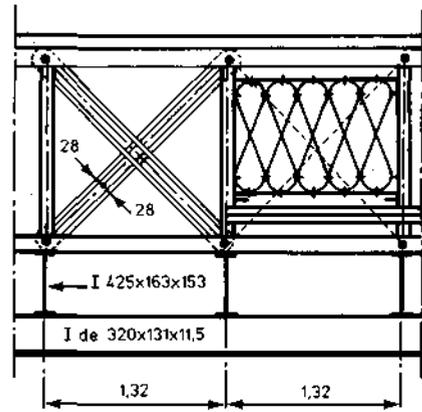
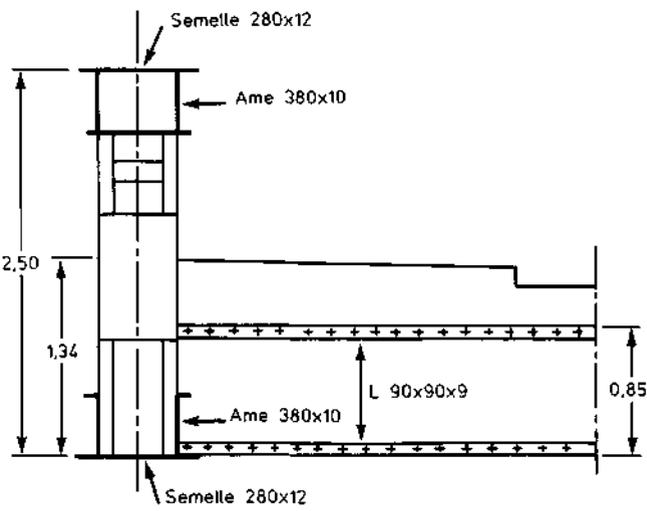
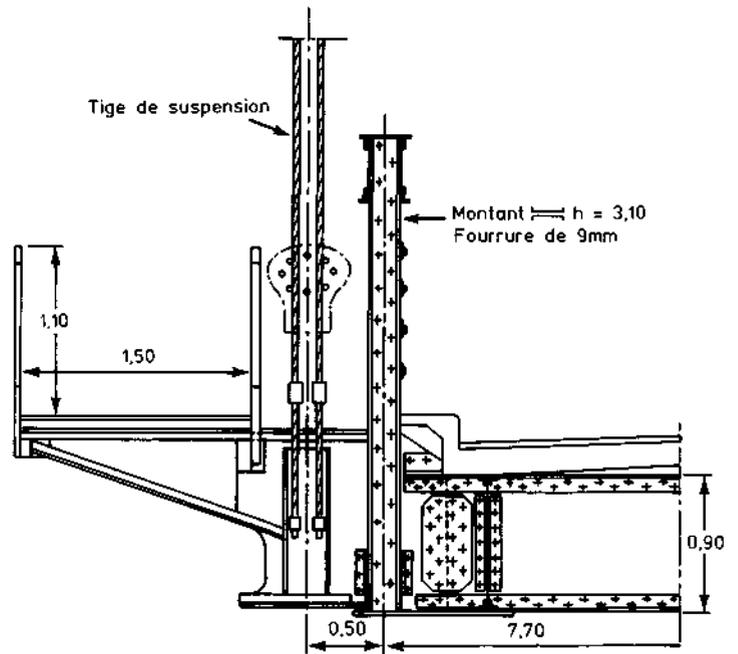


Fig. V-2- Pont de Blagnac (Gironde).

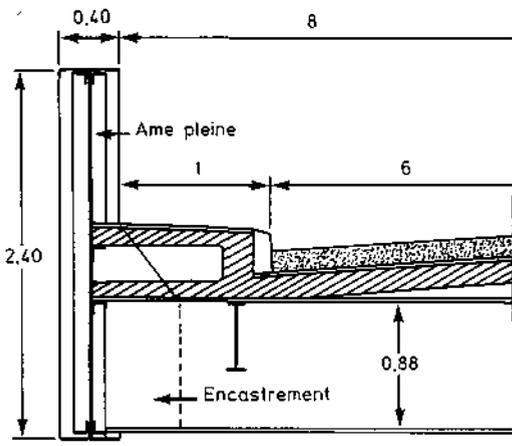


Pont de Tournon (Ardèche).

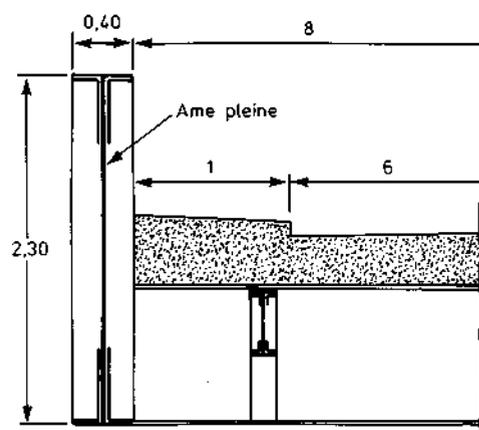
Fig. V-3



Pont de Serrières (Isère).



Pont d'Aiguilly.



Pont d'Aubenas (Ardèche).

V-1.3 – Poutres de rigidité à âme pleine

Il existe un certain nombre d'ouvrages récents et de portées moyennes équipés de poutres de rigidité à âme pleine. L'utilisation de ce type de poutre ne présente pas d'inconvénient majeur ; il est à noter cependant qu'il conduit à une prise au vent plus importante que dans le cas des poutres à treillis. On peut aussi remarquer que les poutres à âme pleine latérales empêchent généralement l'automobiliste d'apercevoir la brèche franchie, puisqu'elles se situent pour une grande part de leur hauteur au-dessus du niveau de la chaussée (fig. V-4).

V-1.4 – Défauts et avaries des poutres de rigidité

Il existe des défauts que l'on retrouve avec une certaine régularité, principalement bien sûr sur les ouvrages anciens. Certains seraient évités si des interventions pouvaient être entreprises à temps, à l'occasion notamment d'opérations d'entretien ou de grosses réparations effectuées sur d'autres parties de l'ouvrage.

Déformation de la poutre de rigidité

a) Déformation en profil en long

C'est au niveau de la membrure supérieure de la poutre, ou de la lisse du garde-corps, que s'observe assez aisément un défaut de tracé en profil en long, l'ouvrage n'étant pas chargé.

– Il s'agit très fréquemment d'une déformation de la poutre de rigidité due à un dérèglement de la suspension, (fluage des câbles de suspension ou dérèglement des suspentes pouvant provenir soit d'un glissement des colliers d'attache, soit d'un desserrage des suspentes, ou, plus rarement, d'un déplacement longitudinal des câbles de suspension).

Cette déformation entraîne une modification des sollicitations dans la poutre de rigidité et dans les suspentes. Il est nécessaire, et souvent suffisant, d'envisager un réglage de la suspension. Mais parfois d'autres mesures peuvent être à prévoir : c'est le cas, par exemple, d'un déplacement longitudinal des câbles dû à un mouvement d'un massif d'ancrage.

– Le défaut de tracé en profil en long peut être dû également à un défaut de construction de la poutre de rigidité elle-même.

Un réglage de la suspension est susceptible d'apporter une amélioration partielle ; à noter cependant

que les hypothèses initiales de calcul de l'ouvrage doivent alors être modifiées en conséquence.

b) Déformation en plan

On a insisté dans les paragraphes précédents sur l'incidence de la conception des poutres de rigidité vis-à-vis de leur stabilité de forme.

– Dans le cas des poutres les plus anciennes – types A et B du § V-1.2 notamment – les membrures ont une faible rigidité transversale et l'encastrement de la poutre sur les pièces de pont est imparfait : dans ces conditions, on constate fréquemment que la membrure supérieure présente des sinuosités plus ou moins prononcées. Cette déformation en plan est liée d'ailleurs bien souvent à une déformation en profil en long, puisqu'à un défaut de profil en long correspond en général un moment de flexion qui engendre un effort de compression dans la membrure supérieure de la poutre : là encore, un réglage correct de la suspension est souhaitable.

Du fait même de la souplesse de la membrure, le déversement, s'il se produit plus facilement, n'entraîne pas en général de dommage irréversible pour la poutre, mais il réduit bien entendu le rôle de cette dernière quant à la répartition des charges entre les suspentes.

On peut envisager une amélioration de l'état de stabilité de la poutre, soit en augmentant l'inertie transversale de la membrure, soit en l'équipant de contrefiches. Il faut cependant être très prudent lorsqu'on envisage ce genre de solutions : outre leur aspect financier, elles nécessitent de toute façon une étude détaillée des répercussions qu'elles peuvent avoir sur les autres éléments de la structure qui sont susceptibles, pour certains, d'être plus sollicités.

– Les poutres de rigidité plus récentes sont mieux conçues vis-à-vis du déversement et ne présentent normalement pas de défaut en plan.

Cependant, si leur dimensionnement s'avère insuffisant au regard des sollicitations qu'elles peuvent être amenées à supporter (trop forte charge associée le cas échéant à un dérèglement de la suspension), le déversement peut conduire cette fois à la ruine de la poutre. A noter l'interaction possible entre le déversement de la poutre – flambement latéral de la membrure supérieure dans son plan – et le voilement local de la membrure (hors de son plan) (cf. chapitre II).

Si l'on n'y prend garde, ces cas d'instabilité peuvent se présenter lorsque l'on modifie certaines caractéristiques de l'ouvrage : renforcement de

pièces, modification du platelage, suppression de haubans, etc.

c) Déformation d'un élément

La déformation peut survenir sur un seul élément, soit en raison d'un effort excessif qui s'est développé au cours du passage d'une trop forte charge, soit en raison de son affaiblissement dû à la corrosion, à la détérioration de sa fixation au reste de la structure (jeu dans les assemblages, rupture des boulons ou des rivets). Le remplacement rapide de l'élément s'impose, d'autant que la déformation observée est en général très prononcée et empêche pratiquement toute transmission d'efforts.

État de la boulonnerie ou de la rivure

Ce point a déjà été évoqué. Il convient cependant d'insister ici sur la surveillance très attentive que l'on doit porter à la boulonnerie ou à la rivure. Elle ne peut se limiter au simple examen visuel de leur état apparent, mais doit comprendre une vérification du serrage à la main et au marteau.

En plus du serrage, il faut contrôler l'usure ou la corrosion des boulons ou des rivets, et l'éventuelle ovalisation des trous réalisés sur les pièces assemblées.

Corrosion

La corrosion n'est pas un problème spécifique aux tabliers des ponts suspendus. On rappellera brièvement que :

- la bonne conservation des poutres dépend beaucoup de leur bonne conception vis-à-vis de l'écoulement des eaux et de l'aération. Il faut veiller à ce que les assemblages et les caissons ne retiennent ni l'eau, ni les poussières et sables humides qui sont des agents très efficaces de la corrosion ;

- la zone la plus sensible, et qui peut passer inaperçue, se trouve souvent à la jonction du trottoir et de la poutre de rigidité (âme ou pièces de triangulation).

V-2 - PIÈCES DE PONT ET LONGERONS

V-2.1 - Les pièces de pont

Ce sont des éléments très importants dans la constitution d'un tablier, car ils assurent la fonction indispensable de transmission des efforts, entre la couverture du tablier et la suspension. Il n'est pas possible d'accepter la déficience d'une pièce de pont puisque chacune constitue un "passage obligé" de ces efforts : la rupture de l'une d'entre elles entraîne la fermeture systématique de l'ouvrage. Aussi, faut-il être très attentif à l'état des pièces de pont, au cours de la visite d'un ouvrage.

Le mode de liaison des pièces de pont à la suspension a évolué avec le temps. Dans les premiers ponts suspendus où, comme on l'a vu précédemment, les poutres de rigidité n'existent pas, les pièces de pont sont directement accrochées aux suspentes ; à chaque pièce de pont correspond un couple de suspentes (fig. V-4).

Dans la structure type suivante, les pièces de pont reposent sur les longerons auxquels sont fixées les suspentes (fig. V-5). A un couple de suspentes ne correspond pas nécessairement une pièce de pont, puisque les suspentes peuvent être intercalées entre les pièces de pont. Le tablier peut recevoir des poutres de rigidité.

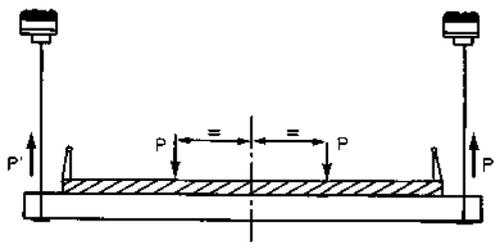
Dans un troisième type de structure, les pièces de pont sont à nouveau directement reliées à la suspension, mais des poutres de rigidité sont intercalées entre la zone chargée de la pièce de pont et le point de suspension (fig. V-6).

Enfin, dans les ouvrages les plus récents, la suspension est fixée à la membrure supérieure des poutres de rigidité (fig. V-7). C'est certainement le schéma le plus satisfaisant vis-à-vis de la transmission des efforts qui sont obligés de transiter par les poutres de rigidité, avant d'être repris par la suspension, et la répartition se fait nécessairement.

V-2.2 - Les longerons

Les longerons supportent le platelage ; ils permettent une certaine répartition longitudinale des charges entre les différentes pièces de pont, mais il faut noter que leur efficacité à cet égard décroît avec leur éloignement du centre de la pièce de pont.

En général, leur membrure supérieure arrive au niveau de la membrure supérieure des pièces de



Charge P placée au droit de la pièce de pont

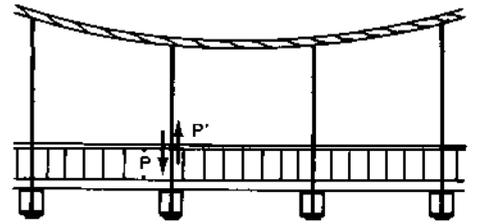


Fig. V-4

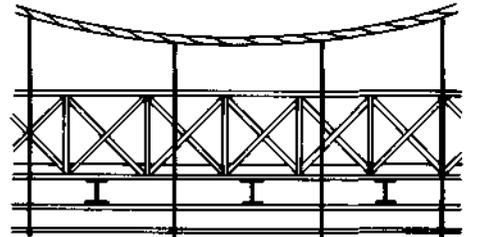
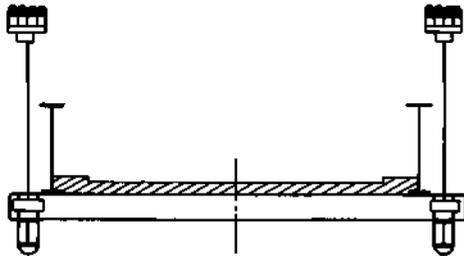


Fig. V-5

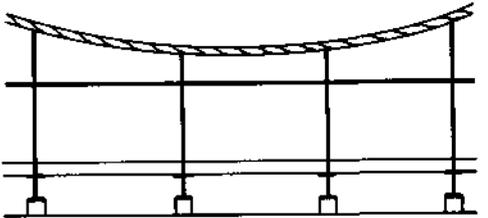
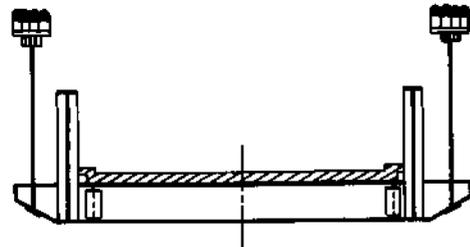


Fig. V-6

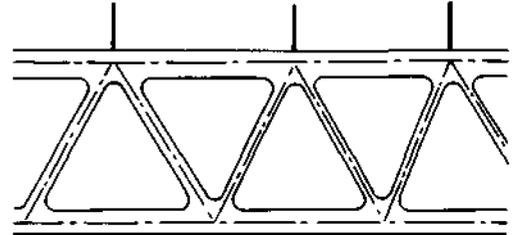
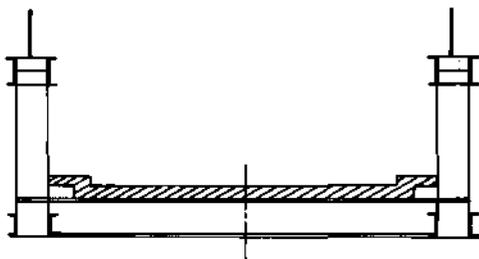


Fig. V-7

pont, et la couverture du pont repose sur le quadrillage de poutres ainsi formé (fig. V-8). Au cours d'une visite, il est conseillé de s'assurer du bon état de l'assemblage. En effet, pour que la répartition longitudinale soit réelle, il est nécessaire que les moments fléchissants se transmettent, ce qui suppose un encastrement correct ; dans le cas contraire, on obtient une suite de poutres indépendantes dont le rôle se borne à porter la couverture.

Sur certains ouvrages anciens, le longeron, que l'on appelle aussi improprement "sous longrine", est placé sous les pièces de pont et ne supporte pas directement le platelage (fig. V-9). Il est constitué d'une poutre ininterrompue et donc continue, fixée par sa semelle supérieure à la semelle inférieure des

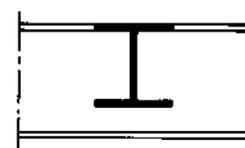
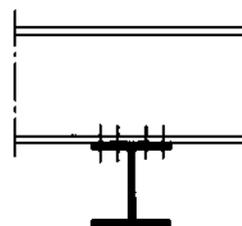
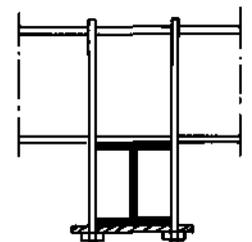


Fig. V-8

a) Longeron placé entre les pièces de pont



b) Fixation par boulons



Fixation par étriers

Fig. V-9

pièces de pont. La fixation se réalise soit directement par boulons soit à l'aide d'étriers. La corrosion, le desserrage des boulons ou des étriers peuvent réduire l'efficacité du longeron dans son rôle de répartition des charges.

V-3 - LES PLATELAGES

V-3.1 - Différents types de platelages Entretien

Les platelages en bois

Il existe encore actuellement en France des ouvrages équipés d'un platelage en bois. Ce mode de couverture est certainement le plus ancien qui ait été utilisé. Son remplacement à l'identique est assez rare, la tendance générale étant de lui substituer une couverture en béton ou en métal, de conception récente, lorsque la structure du tablier le permet.

Le platelage en bois est composé, en principe, de madriers jointifs en bois résistant, qui supportent des planches disposées perpendiculairement aux madriers et faisant office de surface de roulement. Suivant l'espacement des pièces de pont ou des longerons qui supportent le platelage, l'épaisseur totale de ce dernier peut varier de 11 cm minimum (madriers 8 x 23 cm posés à plat et planches de 3 cm) à 25 cm (madriers non jointifs), ce qui représente un poids approximatif de 100 à 160 kg/m² (fig. V-10).

Ce type de platelage présente des inconvénients majeurs : il est bruyant, particulièrement l'été, et glissant par mauvais temps. Son entretien est difficile et relativement coûteux : l'augmentation constante des charges routières accélère la détérioration des éléments qui se désolidarisent assez rapidement.

On constate assez souvent que lors de la réfection d'un platelage on ne met en oeuvre que les madriers, par raison d'économie d'argent et de temps, et par simplification d'entretien. Cette solution n'est pas à retenir, même si elle semble se justifier à court terme. Les madriers, qui sont directement exposés aux alternances de pluie et de soleil, se cintrent et subissent, en plus, une usure précoce au contact des pneumatiques.

La solution qui consiste à placer un revêtement en béton bitumineux sur le platelage en bois n'est pas à retenir non plus. L'étanchéité n'est pas assurée car l'enrobé se fissure très rapidement ; l'uni que l'on obtient disparaît assez rapidement, et l'on retrouve les conditions de circulation antérieures avec un manque de confort notoire. En revanche, l'emploi de plaques minces synthétiques collées a permis, dans certains cas, d'améliorer la rugosité.

Les démontages de platelages en bois permettent d'observer, en général, une bonne conservation de la charpente métallique porteuse. La corrosion des pièces de pont et des longerons est peu développée sur les semelles supérieures, lorsqu'il n'a pas été fait usage de sel pour éliminer le verglas ou la neige aux abords de l'ouvrage.

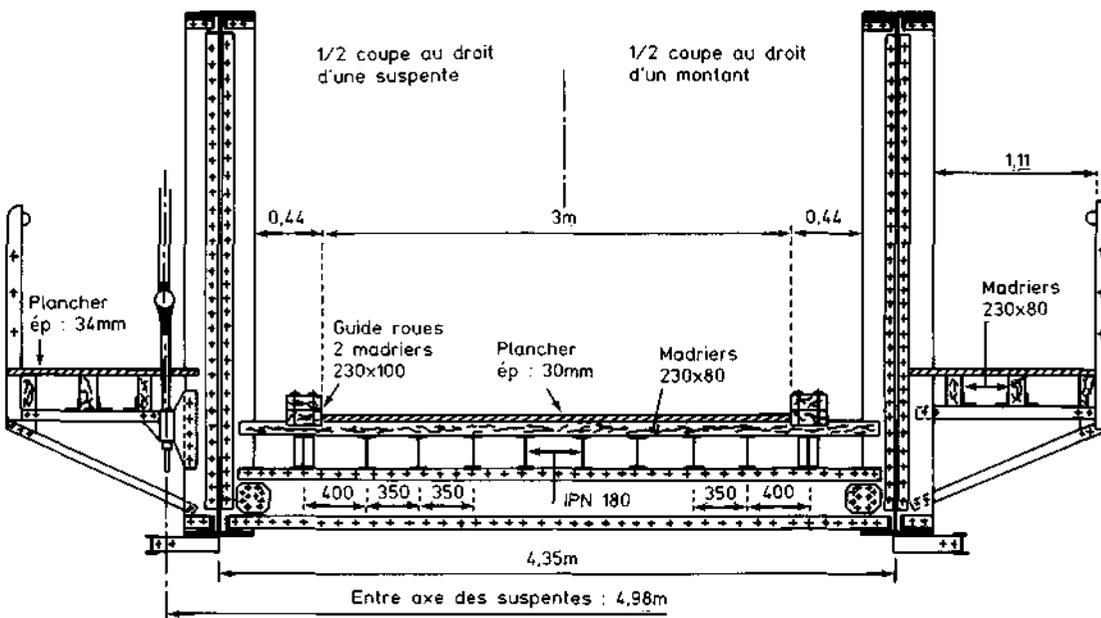


Fig. V-10- Pont Saint-Marcel.

Les causes de détérioration rapide d'un platelage en bois sont souvent les suivantes :

- la trop grande flexibilité locale des éléments porteurs du platelage. La flèche locale trop importante, prise par les longerons ou pièces de pont au droit des roues, provoque des flexions des planches et des madriers qui tendent à se soulever par leurs extrémités, et il faut, dans la mesure du possible, s'efforcer de coincer ces dernières ;
- le retrait du bois par temps chaud et sec ;
- l'emploi de bois de mauvaise qualité.

Lorsque le bois utilisé est de qualité et les éléments porteurs peu flexibles, l'entretien du platelage se limite à des opérations mineures, comme le contrôle du serrage des pièces. Encore faut-il que la circulation sur l'ouvrage n'atteigne pas un niveau élevé : dans le cas contraire, il est plus économique de mettre en oeuvre un autre type de platelage.

Les dalles en béton armé

Elles équipent actuellement la plupart des ponts suspendus. Leur épaisseur est couramment de 17 cm, mais peut être inférieure sur les ouvrages relativement anciens, où elles apparaissent assez souvent fissurées. Il convient de se préoccuper de cette fissuration lorsqu'elle présente un caractère systématique, ou lorsque l'ouverture des fissures atteint 0,2 mm (fig. V-11 et V-12).

Il est à noter, par ailleurs, la réalisation ces dernières années de dalles de couverture en béton léger, qui ont permis un allègement notable de la charge permanente par rapport au béton traditionnel.

Les dalles mixtes

Ce type de platelage, constitué d'une dalle mince en béton armé associée à une tôle en acier au moyen de connecteurs, équipe un nombre restreint d'ouvrages, puisqu'il se justifie surtout pour les grandes portées (Tancarville, Bordeaux). On trouvera la description complète de ce type de platelage dans la monographie des ouvrages précités et dans les recueils spéciaux imprimés par l'OTUA (Office technique pour l'utilisation de l'acier), concernant les ponts métalliques (1966-1967). Le poids au mètre carré de cette couverture est environ de 300 kg.

Les platelages métalliques

Un certain nombre d'ouvrages comportent un platelage composé d'éléments en acier (caissons Ar-

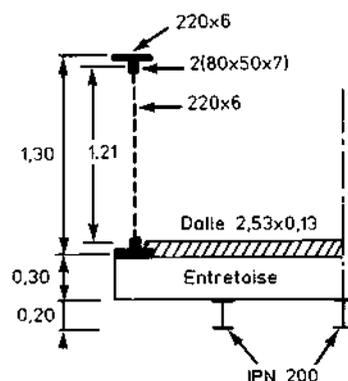


Fig. V-11- Pont de Blagnac (Gironde).

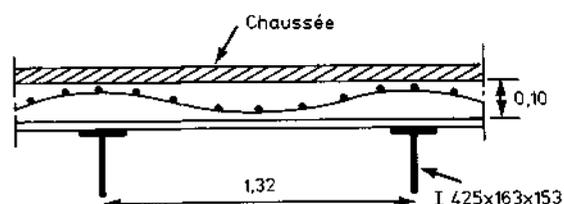


Fig. V-12- Fissure d'une dalle.

nodin par exemple) ou en alliage léger mis en oeuvre par boulonnage.

Ces platelages, qui ne sont pas spécifiques aux ponts suspendus, peuvent être intéressants pour la rénovation d'anciens tabliers, lorsque le trafic de véhicules lourds est faible.

Des indications sur ces types de platelages sont données dans le bulletin "Ponts métalliques" de l'OTUA (n° 9, 1983).

V-3.2 - Participation à la flexion longitudinale et transversale

Le platelage peut participer plus ou moins à la flexion suivant sa nature et son mode de solidarisation aux autres pièces. Si un platelage en bois, par exemple, n'a qu'une influence mineure à cet égard, en revanche les dalles en béton armé fortement connectées ou les platelages métalliques assemblés rigidement aux entretoises ou aux longerons deviennent des éléments qui participent activement à la flexion longitudinale ou transversale.

Ces considérations prennent toute leur importance lorsqu'on reconstitue la couverture d'un pont suspendu. La participation du nouveau platelage

peut avoir des effets très sensibles sur les autres pièces (poutres de rigidité, pièces de pont, longerons).

Si ces effets sont le plus souvent favorables, notamment pour les pièces de pont et les longerons, il peut en aller autrement dans certain cas : l'augmentation de la rigidité de flexion (EI) du tablier entraîne, dans un pont suspendu, l'accroissement des moments qui le sollicitent ; or, la participation du platelage modifie peu en général le module d'inertie v/I du tablier : la contrainte de compression dans la membrure supérieure de la poutre de rigidité peut donc être notablement augmentée, ce qui risque d'entraîner un phénomène d'instabilité élastique (cf. § V-1).

V-3.3 - Réparation et rénovation

Lorsqu'un platelage est en mauvais état, et surtout s'il est d'un type ancien, il est bien souvent préférable de le remplacer plutôt que de le réparer. Plusieurs raisons militent en faveur de cette solution.

D'une part, les couvertures de conception récente sont plus résistantes que celles réalisées précédemment. Si leur prix de revient est plus élevé, elles permettent de réduire notablement les sujétions et les dépenses d'entretien.

Par ailleurs, il peut être envisagé, par un choix adéquat du nouveau type de platelage, dans la gamme de ceux qui ont été décrits ci-dessus :

- d'alléger le tablier, et donc, le cas échéant, d'accroître les charges d'exploitation admissibles sur l'ouvrage (l'allègement du tablier est favorable pour la suspension, mais défavorable pour les poutres de rigidité - cf. chapitre II) ;

- d'augmenter les portées élémentaires de la couverture, d'éliminer ainsi des pièces secondaires porteuses, souvent elles-mêmes en mauvais état, et de simplifier la structure ;

- de renforcer les pièces de pont et les longerons, en les solidarissant convenablement avec la dalle de platelage.

Il est cependant à noter que les possibilités de rénovation du tablier sont, pour un ouvrage donné, relativement limitées, car elles dépendent étroitement :

- des caractéristiques de l'ouvrage,

- de l'état de la suspension,

- de l'état du tablier,

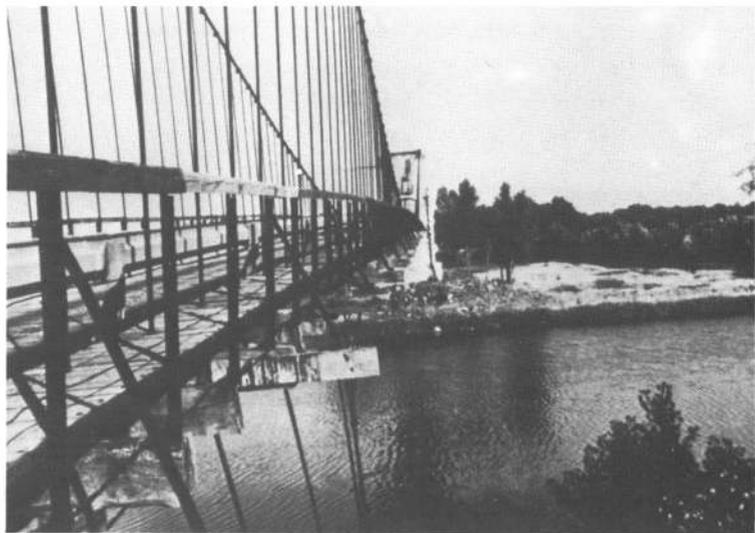
- du niveau de circulation (tonnage et nombre de véhicules),

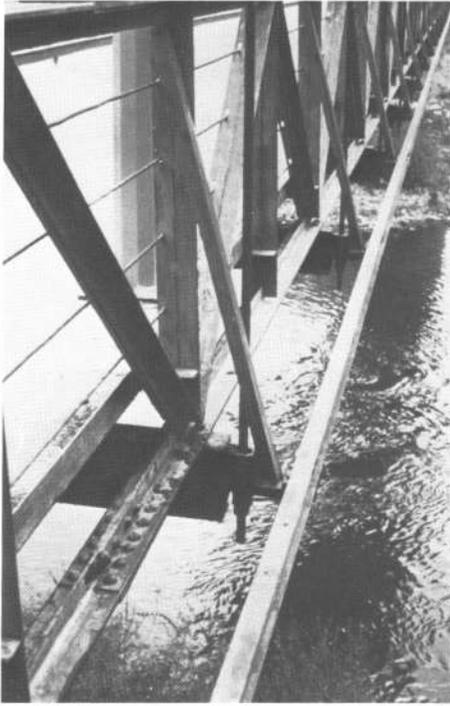
- de la durée de l'interruption de circulation qui peut être envisagée,

ce qui conduit en pratique à effectuer, dans chaque cas, une étude particulière.



Tabliers en bois.



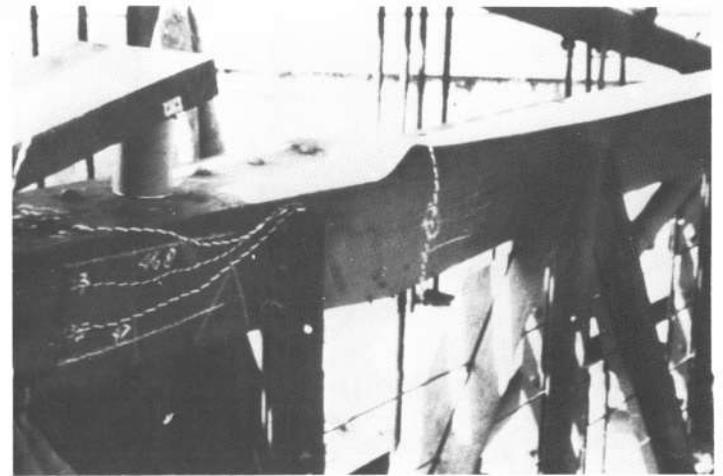
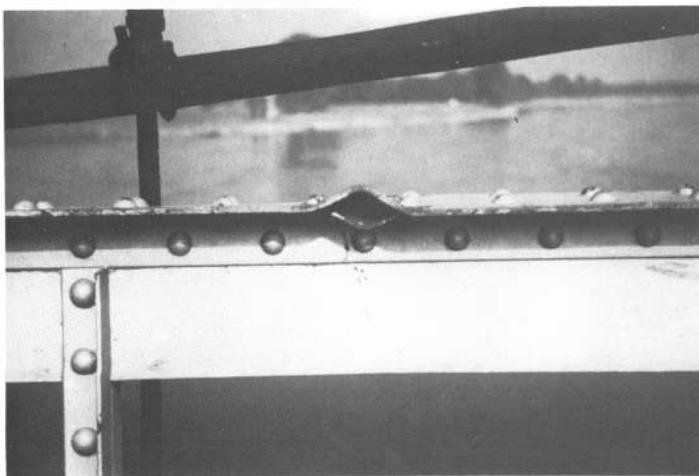


Poutre à treillis reposant sur les pièces de pont (avec contrefiches).

Poutres Arnodin.

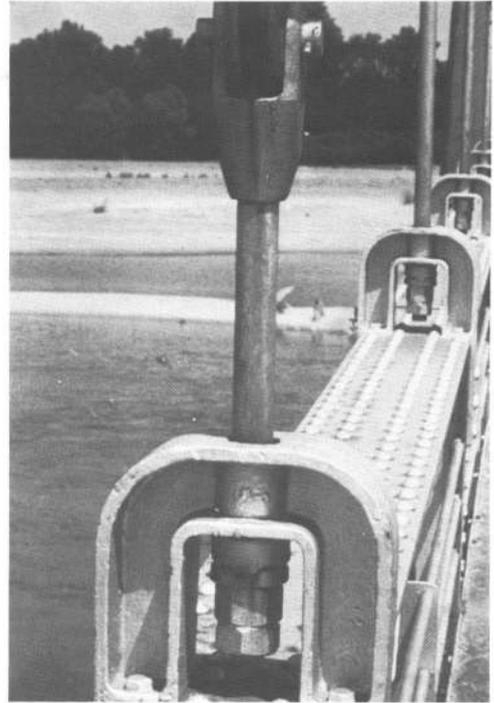


Poutres de rigidité. Déformation localisée de la membrure supérieure.

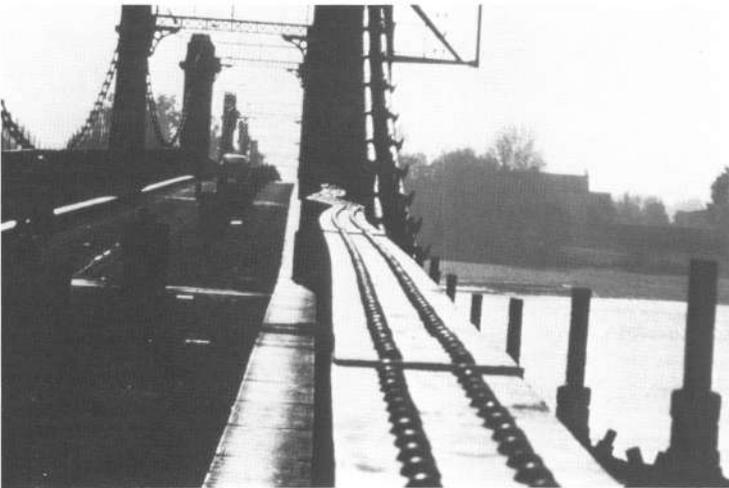




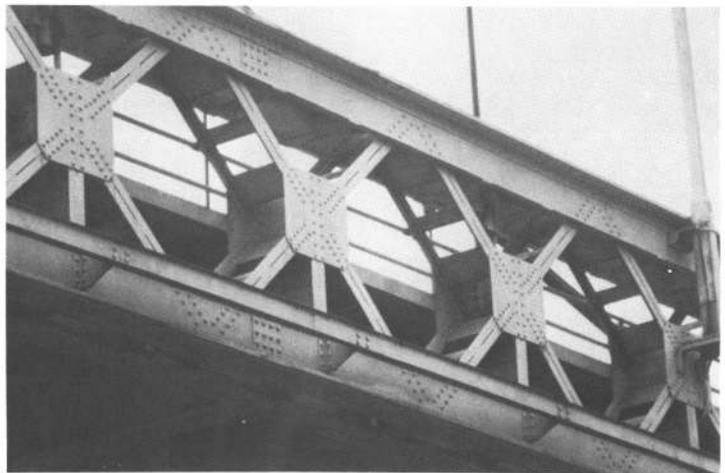
Poutre à âme pleine.



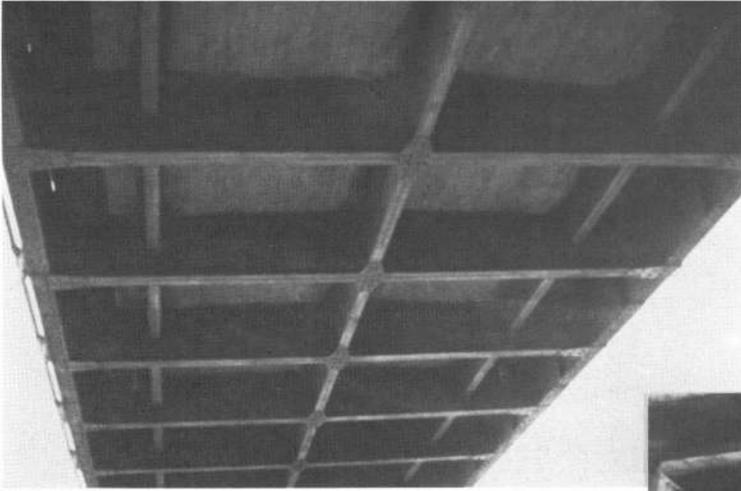
Détail d'attache
de suspenste



Poutre de rigidité. Déformation en plan.



Poutre triangulée.



Dalles en béton armé.



Platelage en bois.



Platelage métallique (caisson Arnodin).



CHAPITRE VI

APPAREILS D'APPUI

VI-1 - INTRODUCTION

Équipement que l'on retrouve dans tous les ouvrages, les appareils d'appui méritent, dans le cas des ponts suspendus, un développement particulier dans la mesure où ils peuvent jouer le double rôle d'initiateur ou de révélateur de désordres liés au comportement général de l'ouvrage.

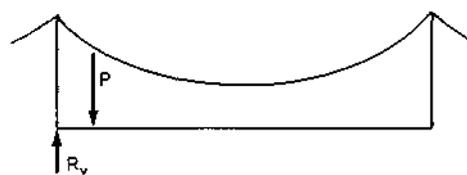
En effet, le schéma de fonctionnement et la conception des appareils d'appui des ponts suspendus sont plus complexes que dans le cas des autres ponts, pour les raisons suivantes :

– les réactions verticales sont en général faibles (1) et, même dans les circonstances courantes d'exploitation, alternativement dirigées vers le bas et vers le haut (fig. VI-1). Elles dépendent en outre de la température et du réglage de la suspension ;

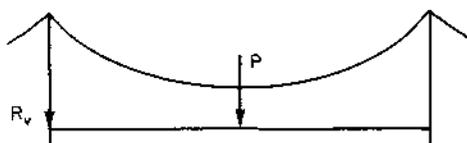
– les réactions horizontales longitudinales sont dues non seulement au freinage, mais aussi à l'obliquité des suspentes lorsque le chargement est dissymétrique (fig. VI-2), événement qui se produit beaucoup plus fréquemment qu'un freinage important. Il est à noter que l'effort maximal dû à l'obliquité des suspentes est, dans les grands ouvrages, supérieur à l'effort maximal à prendre en compte du fait du freinage ;

– du fait des grandes portées des ponts suspendus, les réactions horizontales dues au vent transversal sont importantes. Comme par ailleurs les tabliers présentent le plus souvent une faible rigidité transversale, il convient de tenir compte de leur souplesse (rotation d'extrémité d'axe vertical) ;

(1) La réaction due à la charge permanente peut être prise égale pour un ouvrage bien réglé, au demi-poids de la partie du tablier comprise entre l'appui et la première suspente.



a)



b)

Fig. VI-1

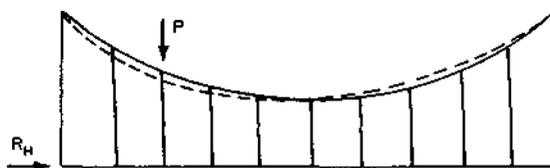


Fig. VI-2

– enfin, en raison de la souplesse d'un pont suspendu, les rotations d'extrémité du tablier d'axe horizontal dues aux charges d'exploitation peuvent être importantes.

Ces différents facteurs provoquent, en général, une usure des appareils d'appui supérieure à celle observée pour les ponts non suspendus.

VI-2 - RÔLE DES APPAREILS D'APPUI

Les appareils d'appui doivent interdire les déplacements d'ensemble du tablier, mais permettre leur libre déformation, de manière à éviter des réactions excessives (fig. VI-3).

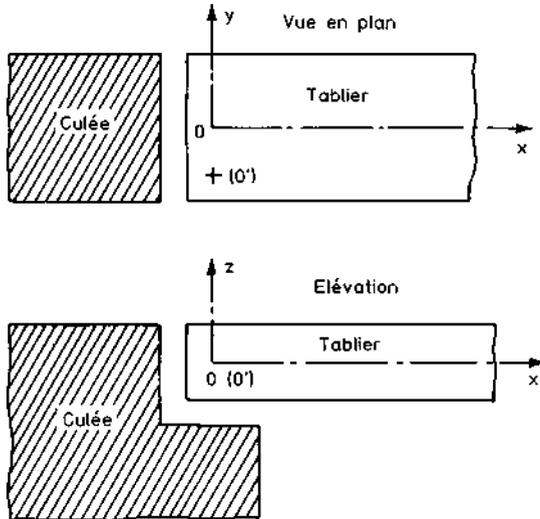


Fig. VI-3

- La translation verticale Oz est empêchée sur tous les appuis, avec deux appareils par ligne d'appui, ce qui interdit également la rotation d'axe Ox ;
- pour permettre la dilatation, la translation longitudinale Ox est libre sur tous les appuis sauf sur un où elle est empêchée (dans certains cas elle n'est pas totalement empêchée, mais limitée (cf. § VI-4.1) ;
- la translation transversale Oy est empêchée sur tous les appuis (piles et culées) : c'est le rôle de la "butée au vent" ;
- la rotation d'axe Oy est libre ;
- la rotation d'axe Oz (ou $O'z$, cf. fig. VI-10) est libre, sauf parfois pour des travées de portée modeste (cf. § VI-4.1).

VI-3 - DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS D'APPUI

Il existe de nombreux types d'appareils d'appui, qui ont été classés ci-après suivant leur fonction.

Leur conception, qui a évolué au cours du temps, dépend souvent de l'importance de l'ouvrage.

VI-3.1 - Appareils d'appui s'opposant à la translation verticale Oz (fig. VI-4).

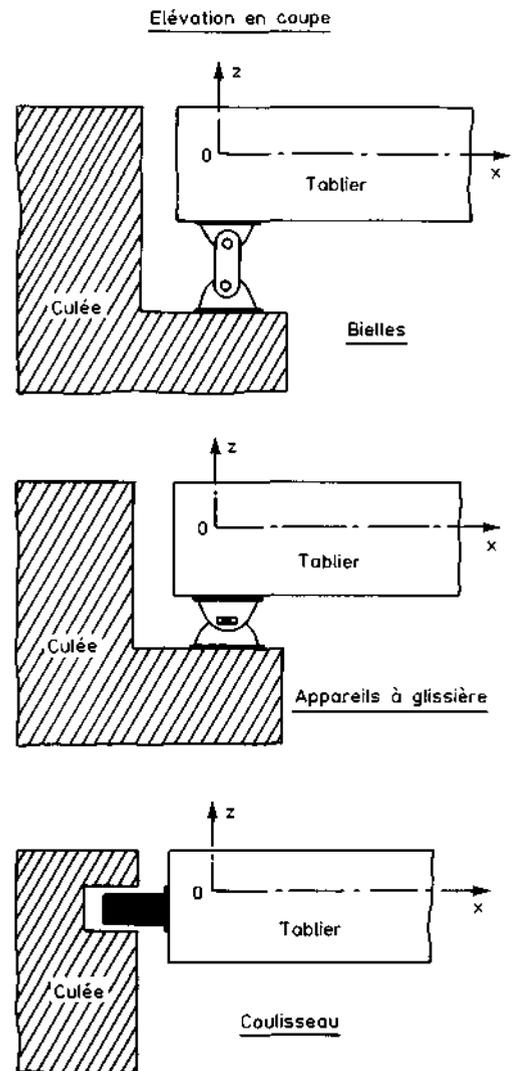
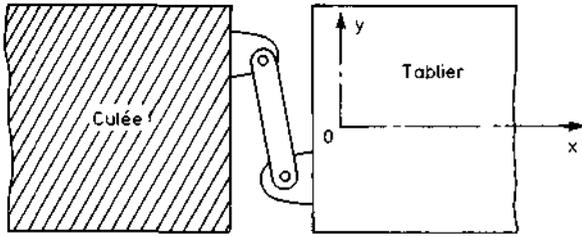


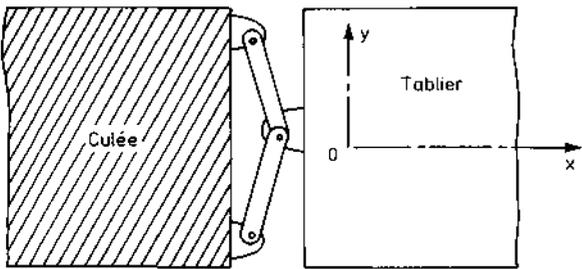
Fig. VI-4

VI- 3.2 - Appareils s'opposant à la translation transversale Oy (butée au vent) (fig. VI-5).

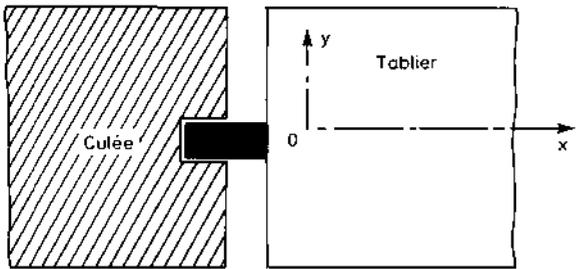
Vue en plan



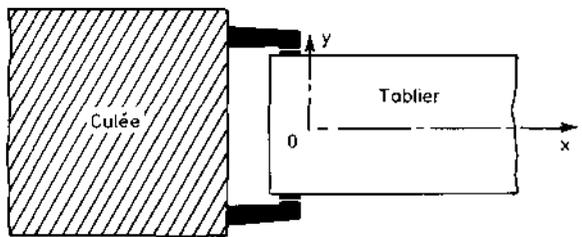
Une bielle horizontale



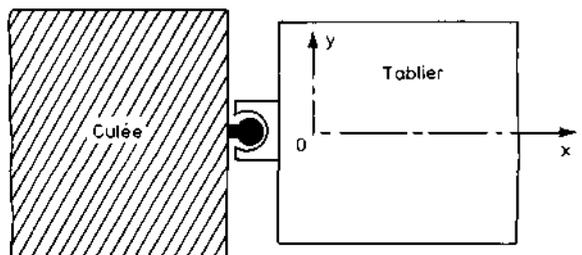
Deux bielles horizontales



Un coulisseau



Deux butées latérales



Une rotule

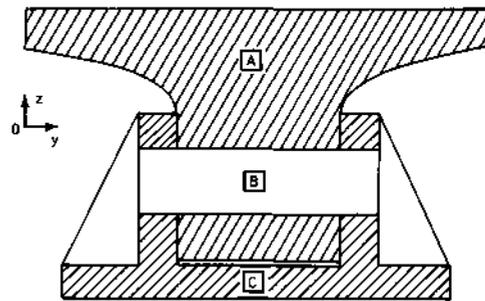
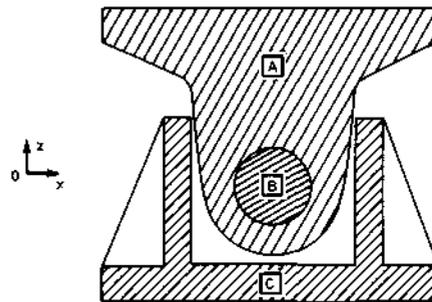
Fig. VI-5

VI-3.3 - Appareils d'appui s'opposant à plusieurs translations

Certains appareils peuvent empêcher plusieurs translations : c'est le cas, en général, des appareils s'opposant à la translation longitudinale Ox , qui empêchent également soit la translation transversale Oy , soit la translation verticale Oz . Il devient alors plus difficile de permettre dans de bonnes conditions les rotations d'axe Oy et Oz (ou $O'y$ et $O'z$).

L'appareil représenté sur la figure VI-6 qui bloque deux ou trois translations, demeure simple, mais la

Demi - coupes

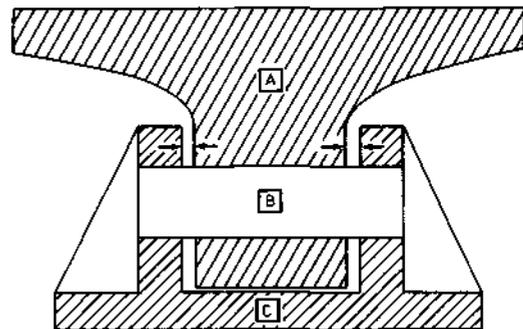


A Balancier supérieur fixé au tablier

B Axe

C Balancier inférieur fixé sur l'appui

Les translations Ox , Oy , et Oz sont empêchées



Variante : Les translations Ox et Oz - mais non Oy - sont empêchées.

Fig. VI-6

rotation d'axe vertical n'est possible que si l'axe est monté avec un jeu suffisant, ce qui limite son emploi aux ouvrages modestes et nuit à sa longévité.

En revanche, lorsque les rotations sont assurées mécaniquement, les appareils deviennent plus complexes : un exemple en est donné sur la figure VI-7.

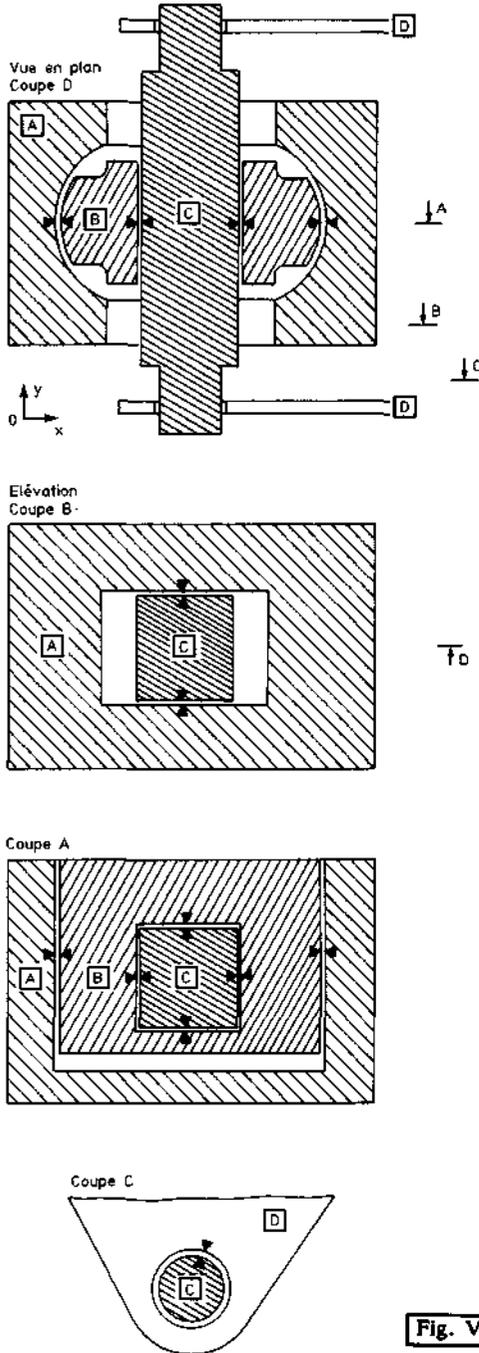


Fig. VI-7

Surfaces en contact usinées

Principe de fonctionnement

Cet appareil d'appui est constitué par 3 parties :

A Bâti fixé à la culée ou au pylône

B Noyau mobile

C Axe carré dans sa partie centrale et rond à ses extrémités qui reçoivent des goussets D du tablier

Les translations O_x et O_z sont empêchées

VI-4 - DISPOSITION D'ENSEMBLE DES APPAREILS D'APPUI

VI-4.1 - Prise en compte du vent transversal

En plus de l'effort selon O_y repris par la butée au vent, le vent transversal est susceptible, pour certaines dispositions des appareils d'appui, de provoquer un moment d'encastrement à l'extrémité du tablier.

Trois schémas sont possibles, selon le choix du parti concernant le déplacement longitudinal de la travée.

a) La travée comporte deux appareils d'appui fixes selon O_x (fig. VI-8) :

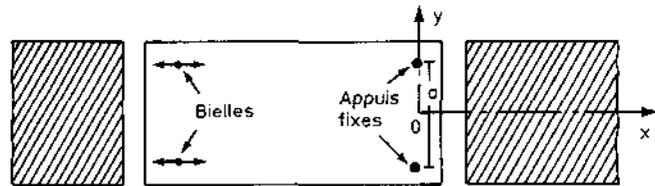


Fig. VI-8

La rotation d'axe O_z est empêchée : le moment d'encastrement dû au vent (pt/ml) vaut $pl^2/8$ et développe dans les appareils d'appui une réaction $F_x = pl^2/8a$, a étant l'écartement des appareils. Comme p croît également avec la portée, on constate que cette réaction varie très rapidement en fonction de l (presque comme l^3).

Pour les portées au-delà d'une centaine de mètres, la réaction devient prépondérante par rapport aux autres réactions longitudinales (freinage, charges dissymétriques). C'est pourquoi ce schéma de fonctionnement n'est adopté, en général, que pour des ouvrages de faible longueur.

b) La travée comporte un seul appareil d'appui fixe qui permet une légère rotation autour de son axe vertical $O'z$ (fig. VI-10 et VI-11). Cette solution, qui évite l'encastrement au vent, a été choisie sur la plupart des ouvrages importants les plus récents. Il importe cependant de noter que :

- les réactions longitudinales sont concentrées sur un seul appareil, qui doit être dimensionné en conséquence ;

- il importe d'assurer dans le temps une liberté de rotation suffisante de l'appareil fixe autour de son axe vertical.

c) La travée ne comporte aucun appareil d'appui fixe (fig. VI-9).

La rotation d'axe Oz du tablier s'effectue dans de bonnes conditions, les appareils d'appui mobiles – bielles verticales en général – présentant une bonne souplesse en torsion.

Les déplacements longitudinaux du tablier dus au passage des véhicules lourds ne sont pas bloqués, mais ils peuvent être amortis (déformation élastique de bielles horizontales constituant une butée au vent, par exemple) ou limités (butée de coulisseau par exemple).

Ces déplacements ne sont pas gênants pour l'exploitation lorsque les appareils d'appui sont en bon état ; ils provoquent cependant à la longue une usure des articulations des bielles (cf. § VI-5.1.).

VI-4.2 - Exemples

Il existe, dans la pratique, de multiples combinaisons pour associer les appareils d'appui en vue d'obtenir les objectifs définis au paragraphe 2.

Dans les ouvrages anciens, un même dispositif assure souvent l'ensemble des fonctions ; de conception rustique, il présente des jeux qui autorisent de manière plus ou moins satisfaisante les déformations du tablier.

Les appareils d'appui des ouvrages plus modernes, ou des ponts anciens rénovés, sont d'une conception plus "mécanique". Ce sont, en général, des appareils distincts qui empêchent les déplacements verticaux et transversaux. Les déplacements longitudinaux, lorsqu'ils sont bloqués, le sont par les uns ou les autres de ces appareils.

a) Le déplacement selon Ox n'est pas empêché.

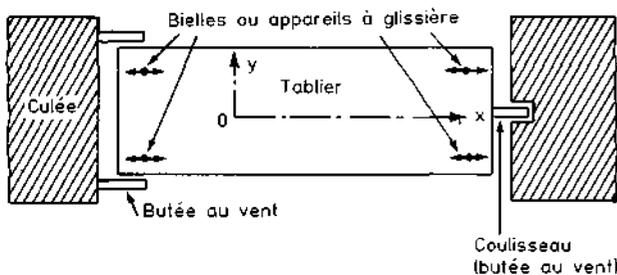


Fig. VI-9

b) Les déplacements selon Ox et Oz sont empêchés par un même appareil.

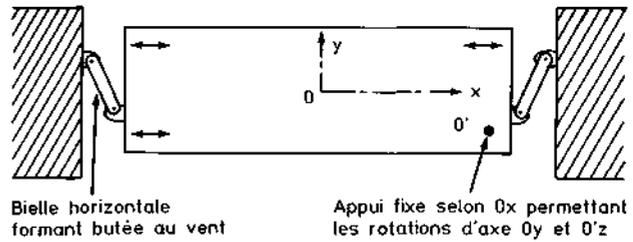


Fig. VI-10

c) Les déplacements selon Ox et Oy sont empêchés par un même appareil.

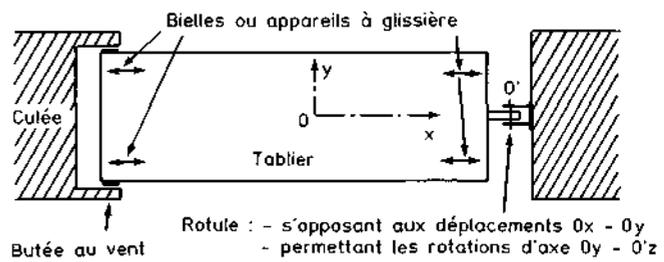


Fig. VI-11

VI-4.3 - Respect du schéma de principe

Il est important qu'un appareil d'appui ne soit pas conduit à remplir un rôle pour lequel il n'a pas été prévu.

Dans le cas de la figure VI-11, par exemple, la réaction d'appui verticale doit passer par les appareils à glissière ou les bielles, et non par la butée au vent O' qui n'est pas dimensionnée en conséquence. La butée doit donc permettre la translation verticale $O'z$ (fig. VI-12).

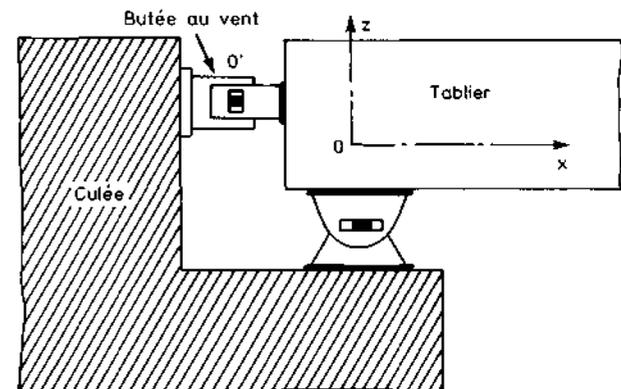
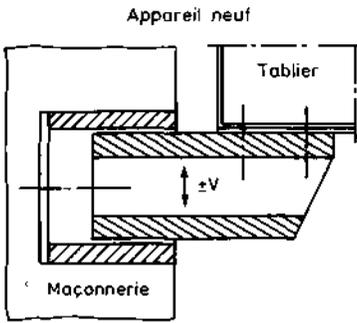
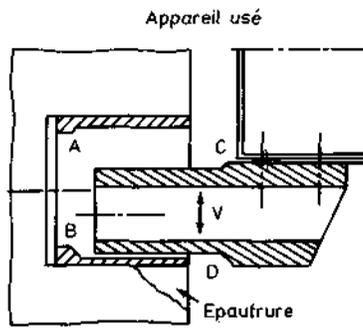


Fig. VI-12

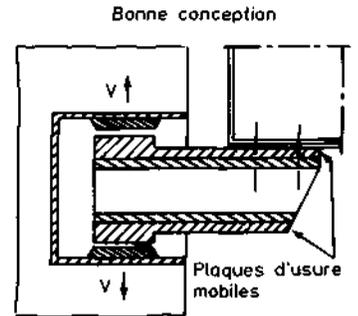
Appuis à surfaces de frottement planes (avec patin fixe)



Concentration d'efforts $\pm V$ sur l'arête de maçonnerie qui casse.

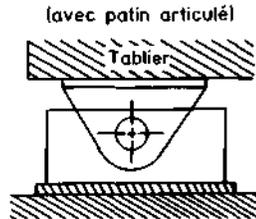


Usure avec bourrelets en A, B, C, D et chocs pour les grands déplacements horizontaux.

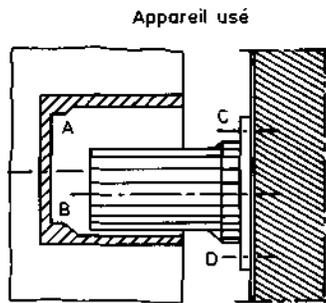
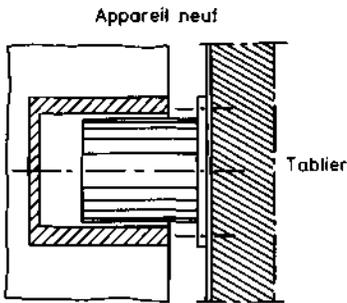


Efforts verticaux $\pm V$ centrés sur surface intérieure de maçonnerie.

Plaques d'usures démontables (pour rattrapage de jeu).



Appuis à surfaces de frottement cylindriques

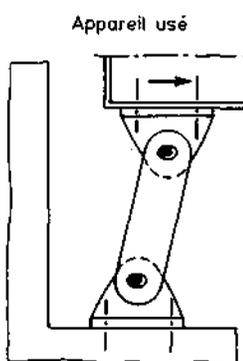
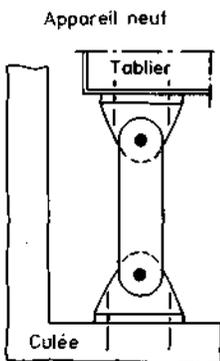


Ce type d'appui est plus résistant à l'usure que celui à surfaces planes.

Pour certains ouvrages les appuis ne sont pas démontables.

Bourrelets d'usure en A, B, C, D et chocs.

Appuis à bielles



Les axes sont sous-dimensionnés.

Jeu dans les articulations.

Après quelques années de service, les bielles sont inclinées et le tablier est en butée sur une culée.

Axes et portées usés
Bielle inclinée

Fig. VI-13

VI-5 - DÉSORDRES PRÉSENTÉS PAR LES APPAREILS D'APPUI

Les désordres peuvent concerner les appareils eux-mêmes ou bien leurs ancrages dans les culées et les piles sous pylônes.

VI-5.1 - Désordres internes des appareils

Ces désordres sont de deux ordres : usure de pièces lorsque les déplacements sont fréquents et de forte amplitude, blocage des appareils dans le cas contraire.

a) L'usure normale des parties métalliques en contact est accélérée lorsque l'appareil est le siège de "battements" lors du passage des véhicules lourds.

Ces battements se produisent d'autant plus précocement que des jeux ont été ménagés dans l'appareil pour permettre certaines déformations du tablier (cf. § VI-3.3.). Ils peuvent, en outre, être accentués par des désordres affectant le comportement général de l'ouvrage : dérèglement de suspension, par exemple.

A l'inverse, dans certains types d'ouvrages, une usure importante d'appareil d'appui, amplifiant les phénomènes de battement, entraîne une majoration des sollicitations dynamiques pouvant amener un dérèglement de la suspension.

Ces phénomènes d'usure concernent tout particulièrement les systèmes du type coulisseau et les bielles (fig. VI-13).

b) Lorsque le déplacement relatif des surfaces usinées est rare ou lent, le dépôt de poussières et la corrosion provoquent à terme un grippage complet de l'appareil, que l'on peut mettre en parallèle avec le blocage des chariots des selles d'appui.

A ce point de vue, les appareils d'appui à glissière ne paraissent pas avoir, jusqu'à maintenant, donné grande satisfaction ; il serait sans doute possible d'améliorer la nature des parties en contact.

VI-5.2 - Descellement des appareils Rupture des tiges d'ancrage Éclatement des maçonneries

Les causes de ces désordres sont multiples et souvent leurs effets s'ajoutent.

a) Ancrage sous-dimensionné ou situé trop près du mur de front : l'ancrage n'a pas toujours été dimensionné

en fonction du trafic que supporte actuellement l'ouvrage ; les chocs provoqués par le passage des véhicules lourds (mauvais état du revêtement de chaussée, joint de dilatation détérioré, dérèglement de la suspension, jeu dans l'appareil d'appui) finissent par entraîner sa ruine par fatigue.

b) Corrosion des pièces d'ancrage : la corrosion est accélérée par les infiltrations d'eau au droit du joint de dilatation.

c) Fonctionnement défectueux de l'appareil d'appui mobile : le blocage d'un appareil d'appui mobile selon Ox, par exemple, empêche la dilatation du tablier et engendre une réaction longitudinale importante non prise en compte dans le dimensionnement de l'ancrage.

d) Fonctionnement défectueux d'un autre appareil d'appui mobile : le mauvais comportement d'un appareil d'appui perturbe le schéma général de fonctionnement de l'ouvrage et peut entraîner des désordres dans les autres appareils.

Par exemple, dans le cas de la figure VI-12, le blocage des appareils à glissière entraîne l'encastrement d'axe Oy du tablier et provoque des réactions longitudinales intempestives, non seulement dans les appareils à glissière eux-mêmes, mais également dans la butée au vent. A noter que le moment d'encastrement dans le tablier peut être alors du même ordre de grandeur que le moment maximal dans le tablier suspendu non encasté.

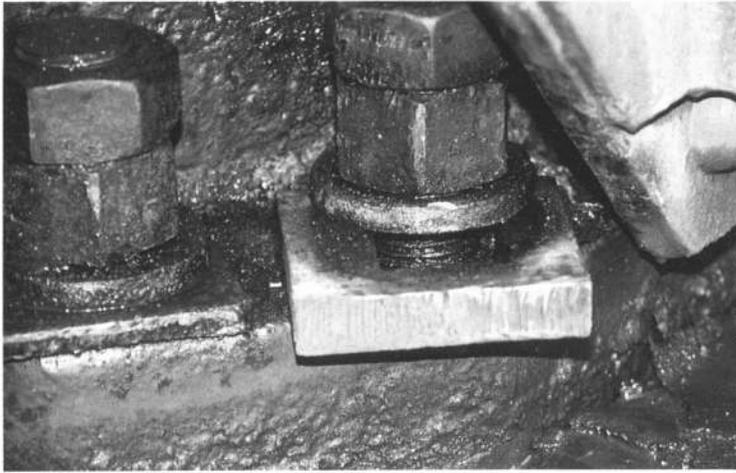
VI-6 - CONCLUSION

Les appareils d'appui sont des organes mécaniques, soumis à des sollicitations complexes et exposés aux aléas climatiques, auxquels de plus on demande la pérennité.

Il est bien certain que la solution parfaite n'existe pas, que l'on fasse appel à des appareils rustiques pour les ponts modestes ou à des appareils plus élaborés pour les ouvrages importants ou subissant un trafic lourd.

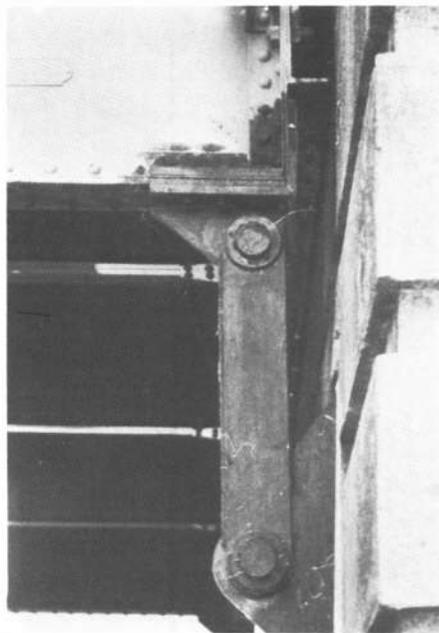
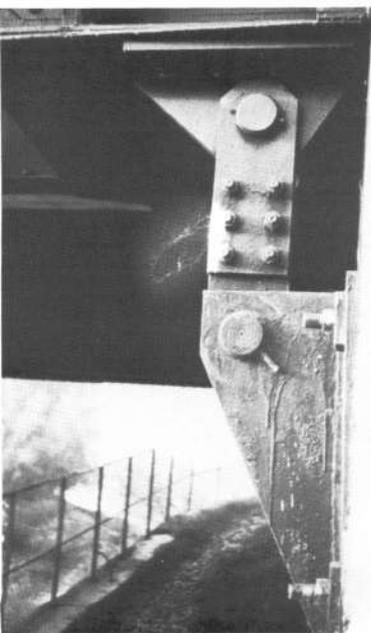
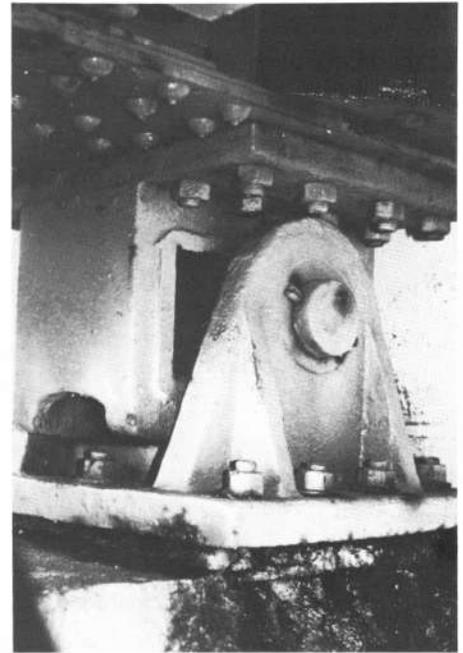
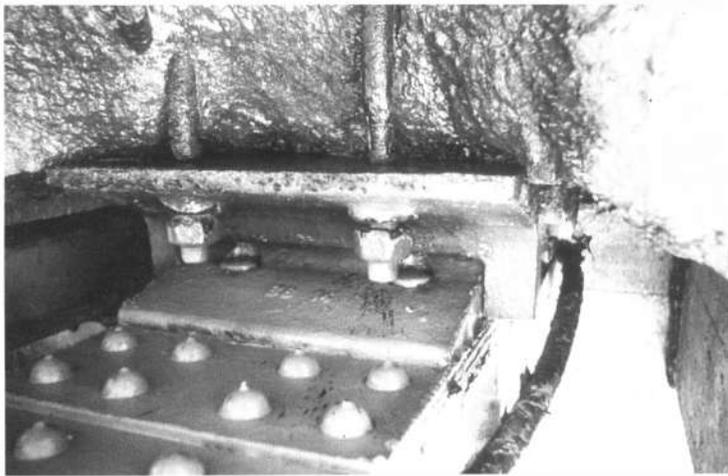
Nous estimons cependant que des résultats satisfaisants peuvent être obtenus lorsque :

- les appareils dans leur ensemble sont conformes à un schéma de fonctionnement correct de la structure ;
- chaque appareil est dimensionné largement au regard de la fonction qui lui est dévolue ;
- un entretien régulier est assuré, des appareils bien sûr, mais aussi de tout l'ouvrage.



Désordre sur appareil d'appui fixe.

▼ Appareils d'appui fixes. ►



Bielles.



Coulisseau.

CHAPITRE VII

PROTECTION DE LA SUSPENSION

VII-1 - INTRODUCTION

Les câbles de ponts suspendus ont reçu, pour la plupart, au moment de leur fabrication, une protection par peinture comportant l'application de produit noir sur chaque fil, complétée par une application du même produit sur chaque couche, puis sur le câble terminé.

La protection extérieure était refaite à intervalles plus ou moins réguliers par application d'un produit similaire - ou que l'on pensait similaire - effectuée le plus souvent au gant après un nettoyage plus que sommaire ou inexistant.

Il semble que, dès l'origine, les produits utilisés étaient des goudrons de houille, résidus de l'usine à gaz la plus proche. Ces produits avaient l'avantage de se comporter comme un "lubrifiant" lors du toronnage et de présenter une grande facilité d'application : en général, une boîte contenant le produit était simplement traversée par le fil au moment du toronnage. En revanche, leur valeur anti-corrosion, sans être absolument mauvaise, était très variable, d'autant qu'ils étaient très souvent utilisés chargés (mélange avec de la chaux, par exemple).

De même, on a employé tous les types de produits noirs utilisés couramment sur les bateaux (bitumes de pétrole, par exemple) ; ils ont été appliqués sur des fils parce que l'on avait "l'habitude" de toujours prendre des "noirs", sous diverses formes : brais ou bitumes.

Ainsi trouve-t-on sur certains ouvrages des mastics à base de brai.

L'inconvénient majeur de ces "noirs" anciens est qu'ils cachent très souvent les développements de rouille sous un revêtement d'apparence saine et continue, et qu'ils permettent à l'eau de se rassembler en poches en bas de paraboles ou en bas des suspentes, près des culots. En outre, ils sont très susceptibles à la température et donnent, l'été, des

égouttures en partie basse souvent très gênantes pour les usagers des trottoirs.

De l'ensemble des inspections, il ressort une très grande diversité de comportement : la tenue dans le temps peut se révéler bonne sur certains ouvrages et très mauvaise sur d'autres avec toutes les situations intermédiaires. Cette diversité peut s'expliquer par les différences de qualité entre produits noirs, qui ne présentent aucune constante dans leur composition, mais surtout par la qualité plus ou moins bonne de l'application, au neuvage ou en entretien.

Aussi, en raison de la sensibilité intrinsèque des câbles à la corrosion et des possibilités de cheminement de l'eau à l'intérieur de ceux-ci du fait de leur structure, il importe de bien comprendre que ces produits anciens ne constituent qu'une façade laissant croire à un parfait état du câble alors que la réalité est tout autre.

VII-2 - EXAMEN DE LA PROTECTION DES CÂBLES ET ACCESSOIRES

Selon la disposition géométrique des câbles (voir chapitre III-4) l'examen est plus ou moins facile, mais il faut savoir que cet examen de l'état de la protection anti-corrosion doit le plus souvent être effectué par un spécialiste, en raison des difficultés à évaluer l'état de certaines zones où la corrosion peut se développer sans être visible.

- Sur les très vieux ponts, où l'on trouve encore des câbles à fils parallèles, la protection apparaît souvent comme boursouflée entre les fils et au niveau des frettes. Il est important de vérifier que ces boursouffures ne cachent pas de foyers d'oxydation trop profonds.

- Sur les ponts présentant des câbles toronnés classiques, le problème principal est celui de l'examen des câbles disposés en couronne ou en faisceau, car il est très difficile ou impossible d'examiner la partie des câbles intérieure à la couronne ou au faisceau.

Les zones à surveiller de façon systématique et avec le plus grand soin sont :

- les parties basses des câbles de retenue et, en particulier, les jonctions avec les culots d'ancrages, car les ruptures de fils ont souvent lieu près de ces derniers ;
- le bas des câbles paraboliques, car l'eau cheminant à l'intérieur de ceux-ci se rassemble dans ces zones ;
- le bas des suspentes et leurs culots.

Il faut y ajouter les zones sous colliers qui sont des zones préférentielles de corrosion ; leur surveillance est toutefois impossible de façon efficace sans démontage.

Par ailleurs, les zones mastiquées doivent être inspectées avec beaucoup de soin car on découvre fréquemment des zones très oxydées sous un mastic apparemment sain, ce dernier se gorgeant d'eau. Ce type de défaut se rencontre en bas de suspentes au niveau des culots ou sur les câbles disposés en faisceau, surtout si toutes les faces sont mastiquées. L'étanchéité s'exerçant rarement dans le sens de l'entrée de l'eau, mais très souvent dans le sens de la sortie, l'eau pénètre à l'intérieur du faisceau, mais ne s'évacue pas car le mastic joue le rôle de gaine.

VII-2.1 - Technique d'examen

Pour évaluer l'état de la protection anti-corrosion, le seul moyen d'investigation efficace reste l'observation visuelle du revêtement.

En effet, les mesures d'épaisseur de peinture sur les câbles n'apportent, à de rares exceptions près, aucun renseignement, car d'une part elles sont très difficiles à faire et, d'autre part les produits noirs sont toujours appliqués en couches très épaisses et très irrégulières ; de plus, comme on l'a vu, ils peuvent cacher une oxydation sous-jacente. Aussi, la mesure globale d'épaisseur par des moyens magnétiques ou électromagnétiques est-elle inefficace.

Reste donc l'inspection visuelle qu'il est recommandé de compléter en enlevant, le cas échéant, par places le revêtement, afin de pouvoir juger de l'état de l'acier des câbles et de l'oxydation de ces derniers. Ces investigations seront menées dans les zones signalées plus haut, et plus particulièrement sous le mastic, afin d'apprécier son adhérence et de vérifier qu'il n'est pas gorgé d'eau ; des prélèvements locaux sont nécessaires pour vérifier ces deux points.

Par ailleurs, les applications de produit étant faites souvent à partir d'échafaudages relativement sommaires, il s'ensuit des hétérogénéités d'épaisseur, voire des manques de protection ; il est donc primordial d'effectuer un examen complet de la périphérie des câbles.

VII-2.2 - Points à examiner

Suivant les différentes zones d'inspection, les points suivants sont à examiner :

Partie courante du faisceau

- adhérence de la protection,
- présence d'oxydation sous-jacente,
- présence de mastic et son état,
- coulures en bas de parabole,
- écaillage,
- fissuration,
- décollement,
- friabilité du produit,
- coulures d'oxyde en provenance de l'intérieur du câble ou du faisceau.

Zones sous colliers

Leur examen n'est en général pas possible sans démontage du collier ; on notera l'état du revêtement à la jonction collier-faisceau et surtout l'adhérence du mastic. De plus, on notera la présence de coulures d'oxyde en provenance du faisceau des câbles.

Suspentes

On fera les mêmes observations que pour le faisceau de câbles.

Au niveau des culots, on examinera tout particulièrement l'état du mastic et, si on observe des gonflements de celui-ci, on recherchera la présence éventuelle d'eau dans ces zones.

Sur certains ouvrages, la présence de débris divers empêche l'écoulement de l'eau qui remplit alors les zones de liaison suspente-tablier en provoquant des risques de corrosion. Il convient de bien examiner ces zones et de faire procéder à leur nettoyage.

Chambres d'ancrage

Ces chambres, très souvent mal ventilées, sont très humides ; il faut donc que l'inspection soit conduite

de façon systématique afin de déceler les anomalies :

- coulures d'oxyde au niveau des culots ;
- mastic gonflé d'eau ;
- peintures cachant une oxydation très importante.

Nota : cas des câbles à fils galvanisés ; en plus de toutes les informations précédentes, on notera l'état de la galvanisation si elle est apparente :

- décollement avec présence de rouille ;
- adhérence de la galvanisation ;
- adhérence du revêtement sur la galvanisation.

VII-2.3 - Suites à donner à l'examen

Au cours de l'inspection, on doit :

- noter tous les points ci-dessus, ces observations permettant au cours des inspections ultérieures de suivre l'évolution de la corrosion ;
- faire nettoyer et enlever les débris et la végétation qui maintiennent une humidité constante au niveau des ancrages ou des bas de suspentes. De même, les chambres d'ancrage seront nettoyées et largement ventilées.

Après l'inspection, il peut être nécessaire de faire appel à des spécialistes capables de juger de l'état de la protection et, s'il y a nécessité, d'effectuer des travaux de remise en peinture. En effet, il est le plus souvent difficile pour un non-spécialiste d'apprécier cette nécessité et, dans l'affirmative, de savoir s'il faut procéder à un décapage complet de la protection existante ou simplement à une remise en peinture partielle.

VII-3 - RÉPARATION DE LA PROTECTION DES PARTIES COURANTES (CÂBLES EN FILS CLAIRS)

On a vu que, dans la plupart des cas, les câbles de ponts suspendus étaient protégés à l'aide de produits noirs, et que l'entretien et la réparation de cette protection étaient effectués, par habitude, avec des produits similaires ou jugés tels. Toutefois, pour être efficace, l'entretien avec ce type de produits doit être renouvelé fréquemment (tous les quatre ans environ), et, si le prix du produit n'est pas très élevé, il n'en va pas de même de l'application. Ainsi a-t-on tout intérêt à mettre en oeuvre des produits plus durables, même si leur coût est plus élevé.

VII-3.1 - Qualités demandées au matériau protecteur

On ne peut pas remplacer ces produits noirs par n'importe quel type de peintures ; en effet, le produit de réfection doit posséder un certain nombre de qualités :

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

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

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

VII-3.2 - Types de produits à appliquer

La réfection de la protection s'effectuant le plus souvent sans mise à nu de l'acier, on est conduit à appliquer des produits compatibles avec le produit noir préexistant, mais ne présentant pas ses inconvénients, en particulier la susceptibilité à la température.

Une très bonne solution au problème est l'utilisation de brai amélioré par l'adjonction de résines : brai-époxy, brai-vinyle ou brai-époxy polyuréthane.

Les brais-époxy conviennent parfaitement, à condition d'utiliser des produits souples : entre 20 et 25 % de résine + durcisseur en poids dans l'extrait sec. Un pourcentage en résine trop élevé (supérieur à 30 %) donnerait un produit cassant avec des

risques de fissuration sous l'effet des déformations du câble.

Les résines époxydiques apportent aux brais traditionnels leurs qualités qui sont principalement :

- une très bonne adhérence ;
- des bonnes performances en traction ou flexion ;
- une très bonne tenue aux cycles thermiques, évitant notamment toutes les couiures constatées avec les brais ;
- et, évidemment, une bien meilleure résistance anticorrosion et une plus grande longévité.

Les brais-époxy sont compatibles avec les brais de houille sur lesquels ils adhèrent correctement après nettoyage. Ils ont l'inconvénient des produits à deux composants, c'est-à-dire une durée de vie en pot limitée.

Les brais-vinyls donnent aussi de bons résultats quand ils sont appliqués sur des vieux brais mais, là encore, la qualité du produit dépend de la teneur en résine vinylique, teneur très variable selon les produits. Ces produits, certainement moins bons sur le plan de la durabilité et s'appliquant en couches moins épaisses, ont le gros avantage d'être monocomposants, donc de n'avoir aucune limite de temps d'application, étant livrés prêts à l'emploi.

Les brais-époxy-polyuréthane sont comparables aux brais-époxy pour leur durabilité ; par contre, leur durée de vie en pot très courte pose de gros problèmes sur chantier pour l'application sur câble.

VII-3.3 - Choix du système de réparation

En dehors de tout problème d'ambiance, le choix du système de réparation est fonction de deux critères :

- état de la protection et nécessité ou non de l'enlever ;
- connaissance exacte du système de protection en place si l'on désire le conserver.

Dans le cas général, il est très difficile de retrouver trace de la nature exacte de la protection effectuée, tant chez les applicateurs que dans les archives du service gestionnaire de l'ouvrage.

Le problème principal est donc de connaître la nature exacte du produit noir en place (brai de houille ou bitume de pétrole) ; en effet, en raison de l'in-

compatibilité entre les brais et les bitumes, il est très dangereux de faire appliquer, *a priori*, un brai-époxy sur un produit noir de nature inconnue. Il est recommandé de faire effectuer l'analyse d'un prélèvement par un laboratoire afin de connaître avec certitude la nature du produit en cause.

VII-3.4 - Choix de la technique de préparation de surface

Le choix de la préparation de surface est un problème très important puisque toute la tenue du système de protection en dépend. Si le choix du système de protection peut être guidé par l'expérience et les essais de laboratoire, la préparation de surface est un cas particulier à chaque ouvrage en raison de l'état de la protection, mais aussi de la disposition géométrique des câbles. Cette préparation peut dépendre aussi du type de produit de protection existant.

Deux types de préparation de surface sont en fait possibles :

1 - *Nettoyage par broissage* : le broissage doit permettre l'élimination de toutes les zones rouillées et surtout de toutes les parties mal adhérentes de vieux produits. Cette technique a les inconvénients :

- d'être toujours incomplète, des traces d'oxydes pouvant subsister sous un produit semblant adhérent ;

- de ne pas être effectuée sur toutes les zones en raison d'une accessibilité difficile et surtout de la durée de réalisation correcte de tels travaux, qui dépend en premier lieu de la qualité et de la conscience de l'ouvrier.

2 - *Décapage par projection d'abrasif* : cette technique, bien meilleure que le broissage, permet l'élimination de toute la vieille protection, sauf peut-être dans les gorges entre les fils où l'élimination totale est souvent difficile.

L'utilisation d'abrasif de remplacement moins agressif que le sable permet, tout en obtenant un décapage efficace, surtout dans le cas de vieux produits devenus cassants, de ne risquer aucune dégradation des fils du câble.

Signalons cependant les difficultés de décapage par temps chaud ; en effet, les produits noirs ramollis par la température n'éclatent pas sous l'impact des grains d'abrasif et au contraire accrochent ceux-ci, en particulier dans les gorges entre les fils.

VII-3.5 - Critères de choix d'un système de protection moderne

Le choix du système de protection dépend, comme on l'a vu, de la préparation de surface et de la nature du produit en place.

Afin de déterminer des critères de choix, de nombreux essais de laboratoire ont été effectués sur différents systèmes de protection appliqués sur tronçons de câbles.

On a d'abord sélectionné, par un essai de résistance au brouillard salin, les meilleurs systèmes sur le plan anti-corrosion ; puis ceux-ci ont ensuite été appliqués sur les câbles de quatre ponts suspendus présentant des dispositions géométriques différentes et situés dans différentes ambiances. L'objectif était d'apprécier, pour la meilleure qualité anticorrosion possible, outre la facilité d'application, l'aptitude des systèmes à être mis en oeuvre sur des fonds dont la préparation de surface n'était pas parfaite.

Les résultats de ces essais figurent en annexe 6.

Compte tenu de ceux-ci on peut donner, tout au moins dans le cas général, pour un type de préparation de surface choisi, le type de protection à utiliser :

- si l'on a la certitude que l'ancien produit est un brai de houille et qu'il est suffisamment adhérent, la meilleure technique est l'application après brossage de deux couches de brai de houille amélioré aux résines (brai-époxy, brai-vinyle ou brai-époxyuréthane);

- si, par contre, on décide d'effectuer un décapage à vif par projection d'abrasif, il est possible d'appliquer, sous les deux couches de brai-époxy, une couche de peinture anticorrosion, par exemple riche en zinc à liant époxy. Cependant, il faut noter que ces peintures riches en zinc n'adhèrent que sur un fond correctement préparé, c'est-à-dire un acier parfaitement décapé, sans trace de rouille ou d'ancien produit. Or, il est d'une part difficile d'éliminer correctement l'ancienne protection dans les gorges entre les fils et, d'autre part, le produit protecteur de chaque fil, interne au câble, peut, en ressuant, entraîner des décollements de cette couche de peinture au zinc. Aussi, faut-il réserver cette sous-couche anticorrosion aux cas où elle est strictement nécessaire, c'est-à-dire aux ouvrages situés dans des atmosphères très agressives en apportant un soin tout particulier à la préparation de surface. Dans les cas courants, on a le plus souvent une bien meilleure sécurité en appliquant directement, sans

primaire anticorrosion, deux couches de brai amélioré par l'adjonction de résine.

Remarques

- Dans les régions très ensoleillées où le vieillissement des brais-époxy par rayonnement ultraviolet est important, il vaut mieux appliquer trois couches de brai-époxy afin de retarder le risque de craquellement de ces produits jusqu'à l'acier. De plus, le décapage à vif par projection d'abrasif avant application des couches de brai-époxy est toujours préférable à une application sur ancien brai, même parfaitement adhérent. En effet, les couches de brai inférieures étant plus souples et plus sensibles aux variations de température peuvent, en se déformant, entraîner une fissuration des couches de brai-époxy.

- Dans certains cas particuliers, on peut utiliser à la place des brais-époxy un système comportant une couche d'époxy et une couche de polyuréthane ; dans ce cas, il est obligatoire d'appliquer au préalable une couche de primaire en zinc à liant époxy.

VII-3.6 - Application des produits

Le mode d'application est généralement la brosse, le pistolet n'étant pas adapté en raison des pertes de produit et surtout de la difficulté à appliquer un film régulier sur toute la périphérie du câble.

Les difficultés d'application sont très différentes selon la disposition géométrique des câbles (câbles isolés, nappes, faisceau, couronne), de même que les possibilités de décapage par projection d'abrasif. Le cas où les travaux sont les plus difficiles à réaliser est celui de câbles en nappe ou en couronne pour lesquels la distance libre entre câbles ne permet pas de mettre en oeuvre une protection efficace, et encore moins d'effectuer une préparation de surface correcte.

Les recommandations à observer au moment de l'application sont celles, classiques, concernant les produits à deux composants :

- mélange correct des deux composants ;
- observation du temps de mûrissement avant application ;

à ajouter à celles relatives à l'application de peintures en général :

- application de la première couche dans un délai inférieur à quatre heures après le décapage ;

- observation des délais entre couches, en particulier observation très stricte du délai limite de recouvrement de chaque produit pour éviter tout risque de décollement entre couches ;

- observation de la température et de l'hygrométrie limites d'application ; en particulier, ne pas descendre au-dessous de 10 °C dans le cas d'emploi de brai-époxy.

Sur le plan pratique, la première couche sera diluée (10 % en poids environ) avant application ; on obtient ainsi un produit qui pénètre et mouille beaucoup mieux le câble.

Enfin, les contrôles d'application concernant la continuité et le bon recouvrement de tout le câble par le produit de protection ne peuvent être que visuels, les mesures d'épaisseur par n'importe quel moyen ne donnant que peu de renseignements utiles, compte tenu de la structure d'un câble.

VII-3.7 - Cas particuliers des finitions aluminium

Les finitions aluminium sont quelquefois utilisées sur des brais ; elles ont alors l'avantage de permettre au produit noir sous-jacent d'être moins exposé à la chaleur du soleil et l'on évite ainsi les coulures de brai. Par contre, elles vieillissent très mal en s'écaillant et en se décollant.

Aussi, lors des travaux d'entretien, est-il très difficile d'appliquer une peinture sur une finition aluminium car on n'est jamais sûr d'une bonne adhérence. On doit donc pratiquement prévoir un décapage avec élimination de toute la finition.

En variante, certaines sociétés proposent une deuxième couche de brai-époxy pigmentée d'aluminium sur la première couche de brai-époxy. On réduit ainsi les décollements entre couches que l'on risque toujours d'avoir avec une finition aluminium à liant alkyde, par exemple. Par contre, l'entretien sur ce type de produit est difficile et il est préférable d'éliminer cette couche de brai-époxy pigmentée avant tout travail de réfection.

VII-3.8 - Masticage des faisceaux de câbles

Dans le cas d'un faisceau de câbles, on est bien souvent tenté d'effectuer un masticage de toutes les zones entre câbles en pensant créer une barrière contre l'eau et l'humidité. L'expérience prouve que cette protection n'est jamais efficace et que, bien au contraire, on a tendance à empêcher l'eau de sortir du faisceau. Ainsi, sur un ouvrage, un gainage mis

autour du faisceau pour éviter les coulures de produits noirs provenant de l'intérieur des câbles a-t-il donné des résultats catastrophiques, l'eau restant dans le faisceau et provoquant une corrosion accélérée, surtout au niveau des colliers.

Aussi, si le masticage est intéressant en partie haute et sur les faces supérieures du faisceau afin d'éviter au maximum à l'eau de pénétrer, il ne faut surtout pas empêcher celle-ci de sortir, c'est-à-dire mastiquer en partie basse et sur les faces inférieures du faisceau. Le mastic ne doit en aucun cas constituer un gainage autour du faisceau de câbles.

Les mastics en général vieillissent assez mal en devenant cassants dans le temps et en perdant de l'adhérence au support. De plus, très souvent, ils forment des poches qui retiennent l'eau.

Des essais comparatifs ont été effectués tant en laboratoire que sur ouvrages, sur des mastics à base de brai chargé à l'amianté, de brai-époxy, d'époxy, et de polyuréthane. Les meilleurs résultats sont obtenus avec le mastic polyuréthane qui reste très souple et très adhérent dans le temps. Ces mastics polyuréthane ont de plus l'avantage d'adhérer correctement à la fois sur des fonds époxy, polyuréthane et brai-époxy. Les mastics brai-époxy donnent également de bons résultats, avec toutefois un vieillissement plus rapide et des risques de fissuration plus importants.

Enfin, précisons que la meilleure technique consiste à appliquer le mastic directement sur l'acier décapé, donc sous les couches de peintures ou encore entre les deux couches de brai-époxy. L'application du mastic à l'extérieur de câbles après mise en oeuvre du système de protection complet conduit très souvent à de mauvais résultats, le mastic devenant cassant ou se gorgeant d'eau.

VII-4 - PROTECTION DES ZONES DE CÂBLES SOUS COLLIERS

Les zones sous colliers étant le siège privilégié de dégradations par corrosion, il est donc très important de les protéger ; malheureusement, la mise en oeuvre de leur protection nécessite le démontage des colliers, opération très onéreuse ; aussi dans le cas où elle est réalisée, il importe d'effectuer une protection excellente afin d'éviter qu'un nouveau problème de corrosion n'oblige à un redémontage prématuré.

Sur des ouvrages très importants, des protections très riches ont été appliquées :

1 – Décapage à vif (correspondant au degré SA₃ de la norme SIS 055900-1967) ; métallisation au zinc 120 µm, colmatage par une peinture riche en zinc métal, deux couches de brai-époxy. Cette protection très riche est certainement excellente, mais elle pose des problèmes de mise en oeuvre très difficiles, et implique une dimension de faisceau suffisante pour que le décapage et la métallisation puissent être faits correctement. Cependant, il est très difficile d'avoir un décapage parfait sur toute la périphérie du faisceau de câbles, et en particulier de n'avoir aucune trace d'ancien produit noir dans les interstices entre les fils. En outre, des délais très courts doivent être observés d'une part entre le décapage par projection d'abrasif et la métallisation, et d'autre part entre la métallisation et son colmatage ; il faut donc observer un planning de chantier très rigoureux et effectuer le travail collier par collier.

2 – Décapage à vif ; deux couches de peinture riche en zinc-métal ; deux couches de brai-époxy ; cette protection est plus facile d'exécution que la précédente, en particulier en ce qui concerne les délais entre couches ; on n'a pas à effectuer un colmatage de métallisation dans un délai très court. Par contre, la propreté du décapage à effectuer reste la même.

Par ailleurs, on peut être amené à appliquer, après décapage, un brai-époxy et primaire anticorrosion, sous colliers alors que les zones hors colliers, protégées par un bitume de pétrole, ne nécessitent pas d'entretien avec décapage du bitume. En raison des risques d'incompatibilité quand on applique un brai-époxy sur un bitume, il faut reporter la zone de recouvrement des deux produits en dehors de la zone sous colliers afin de pouvoir, le cas échéant, remédier à des décollements entre couches.

La protection du collier lui-même est très importante :

– la partie interne peut être protégée par le même système que la zone sous colliers (peinture riche en zinc-métal et deux couches de brai-époxy) mais, compte tenu de la nature des pièces métalliques constituant ces derniers, elle peut n'être protégée que par application de deux couches de brai-époxy ;

– la partie externe est en général protégée comme les parties courantes du faisceau, l'application d'un primaire anticorrosion n'étant pas justifiée dans le cas général.

Enfin, très souvent, à la jonction collier-faisceau de câbles on utilise un mastic pour empêcher l'eau de pénétrer sous le collier. Là encore, le mastic ne doit être appliqué que sur la partie supérieure, afin de permettre à l'eau qui aurait pénétré de s'écouler. Il est recommandé d'utiliser le même type de mastic que sur le faisceau de câbles.

Remarque

Dans le cas de câbles disposés en couronne ou en nappe, la protection des zones sous colliers ou sous attaches, bien qu'aussi délicate à effectuer, entraîne le recours à des solutions *a priori* moins onéreuses : la ventilation mieux assurée diminue en effet les risques de corrosion.

VII-5 - PROTECTION DES SUSPENTES

Les suspentes peuvent être de deux types :

1- les suspentes en barres d'acier ne posent généralement pas de problèmes de protection ; un système brai ordinaire ou brai-époxy convient parfaitement pour la protection ;

2- pour les suspentes en câbles avec culots, la protection est à considérer de la même façon que pour les câbles et pose des problèmes identiques, surtout au niveau des culots d'attache inférieurs dans lesquels l'eau a toujours tendance à pénétrer car elle chemine dans la suspente.

En sortie de culot le câble est en général mastiqué ; mais il faut se méfier des entrées d'eau à ce niveau. Tous les travaux de réfection commencent par un nettoyage très soigné de ces zones, afin de mettre l'acier à nu et de bien vérifier avant toute application qu'il n'est pas oxydé.

VII-6 - PROTECTION DES CULOTS D'ANCRAGE

Les zones de jonction câbles porteurs-culots d'ancrage sont très sensibles à la corrosion d'autant que, dans la plupart des cas, les chambres d'ancrage ne sont pas ou sont peu ventilées.

Leur protection doit donc être très bien mise en oeuvre et, en particulier, avant tout travail de réfection, il faut éliminer systématiquement toutes les boursoufflures qui sont des pièges à eau.

Comme pour les culots en bas de suspentes, les nouvelles applications ne seront effectuées que sur un acier parfaitement sain. Après décapage, on reprendra ensuite ces zones avec le plus grand soin, en évitant de penser qu'un excès de produit, ou pire de mastic, constituera une barrière plus efficace contre la corrosion.

VII-7 - PROTECTION DES CÂBLES EN FILS GALVANISÉS

Jusqu'à ces dernières années, les câbles utilisés en France pour les ponts suspendus, même lors des remplacements de suspension, étaient en règle générale des câbles en fils clairs. Actuellement, la tendance a évolué et tous les câbles mis en oeuvre sont, à de rares exceptions près (conditions particulières d'agressivité du site), des câbles en fils galvanisés. Ceux-ci posent quelques problèmes de protection particuliers, notamment au niveau de l'accrochage du système de peinture anticorrosion ; en effet, il faut bien savoir que la galvanisation ne constitue pas, à elle seule, une protection efficace et sérieuse, et qu'elle doit toujours être complétée par un système de peinture.

VII-7.1 - Fils galvanisés avec produit noir

Les fils galvanisés peuvent être traités au toronnage comme des fils clairs, avec application au trempé d'une couche de produit noir ; celui-ci, en ressuant, empêche dans la plupart des cas l'application, sur le câble terminé, d'un autre type de produit, et l'on cumule les difficultés déjà rencontrées sur les câbles en fils clairs avec le problème de l'adhérence d'un produit noir sur l'acier galvanisé.

En effet, la mise en peinture de l'acier galvanisé est toujours un problème délicat, et l'on observe souvent des décollements dus à un très mauvais accrochage de la peinture sur des pièces en acier galvanisé, particulièrement lorsque ce dernier est neuf.

Comme pour les câbles en fils clairs, des essais de sélection de systèmes de protection ont été effectués, tant en laboratoire que sur ouvrages, essais qui permettent, pour la protection de ce type de câbles, de dégager les idées suivantes :

- La préparation de surface de l'acier galvanisé avant peinture reste un problème délicat à résoudre ; elle doit nécessairement comprendre :

• si l'acier galvanisé est neuf, un dégraissage très

soigné ; ce dégraissage peut être effectué avec un solvant du type perchloréthylène ;

• dans le cas d'un acier galvanisé ayant vieilli, un brossage, afin d'éliminer tous les sels de zinc mal adhérents ; rappelons qu'il ne faut effectuer aucun décapage de l'acier galvanisé par projection d'abrasif, décapage qui diminuerait l'épaisseur de la couche de zinc ;

• dans le cas où le zinc présente des écaillages locaux avec corrosion des zones où l'acier est nu, l'application en retouche d'une peinture riche en zinc est souhaitable ; ces retouches ne doivent être effectuées qu'après nettoyage très poussé des zones oxydées.

- Ensuite, et à condition que le produit noir de protection interne ait cessé de ressuer, l'utilisation d'une couche primaire d'accrochage donne de meilleurs résultats d'adhérence qu'une peinture riche en zinc. Comme couche primaire d'accrochage, on peut utiliser une peinture primaire réactive à base d'acide phosphorique (3 % en poids) ou un primaire époxydique fluide, pigmenté au chromate de zinc (ou de strontium) avec lequel on obtient de très bons résultats.

Le système comporte ensuite deux couches de brai amélioré aux résines (brai-époxy, etc.), comme pour les câbles en fils clairs.

D'autres types de produits peuvent être également utilisés, tels que les systèmes époxy ou polyuréthane ; ils ont alors l'avantage de ne pas être de couleur noire.

VII-7.2 - Fils galvanisés sans produit noir

Lors de changement de câbles récents sur quelques ouvrages suspendus, il a été mis en oeuvre des câbles en fils galvanisés où le produit noir classique de protection des fils était remplacé par une peinture monocomposant riche en zinc. Cette peinture appliquée au trempé permet, même si elle n'adhère pas parfaitement au revêtement de zinc, de colmater tous les vides entre fils lors du toronnage. Par ailleurs, on ne court aucun risque de détrempe ou de décollement du système externe de protection, comme dans le cas des produits noirs qui suintent plus ou moins. Cette modification permet donc des améliorations très notables de la protection anticorrosion.

En revanche, d'une part le problème de l'application au trempé n'est pas totalement résolu et, d'autre part, la peinture durcissant entre les fils contrarie leur mise en place les uns par rapport aux

autres et rend le câble terminé plus raide, ce qui crée des difficultés lors des manutentions de transport et de mise en oeuvre.

Par ailleurs se pose le problème de préparation de surface du câble terminé, car les liants des peintures monocomposant riches en zinc sont à base de caoutchouc isomérisé ou d'ester d'époxy ; ces liants sont donc facilement détrempés lors de l'application d'une couche d'époxy zinc ou du primaire d'accrochage. Une solution possible est de ne pas mettre de peinture monocomposant riche en zinc sur la dernière couche de fils lors de la fabrication du câble.

En tout état de cause, il convient de procéder à un nettoyage très poussé du câble avant mise en peinture *in situ*, opération qui, seule, permettra un bon accrochage de la protection.

On peut alors appliquer des systèmes de peinture

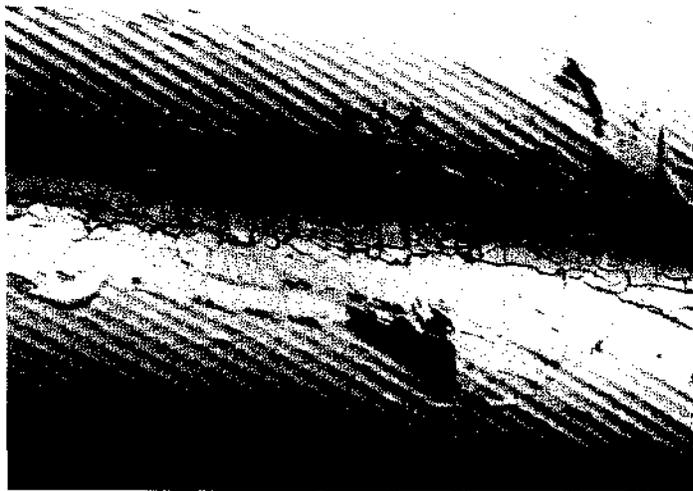
autres que ceux à base de produit noir en observant les recommandations précédentes concernant la préparation de la surface et l'application des couches.

Un système de protection homogène sur le plan anticorrosion peut être par exemple :

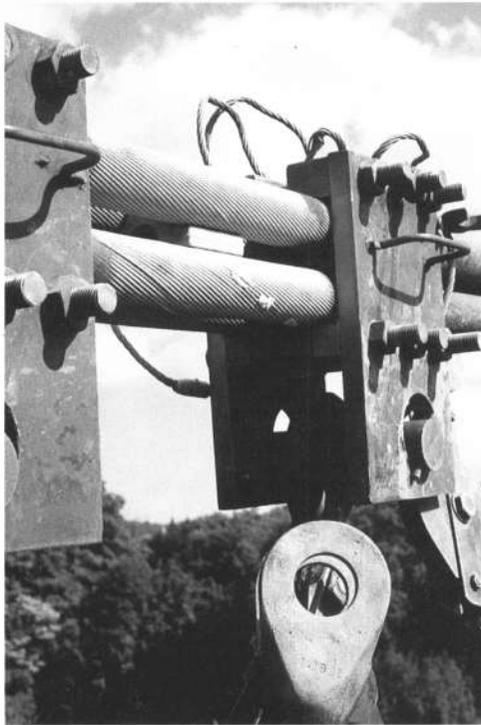
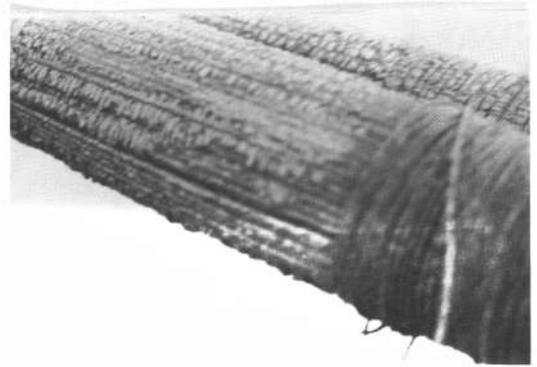
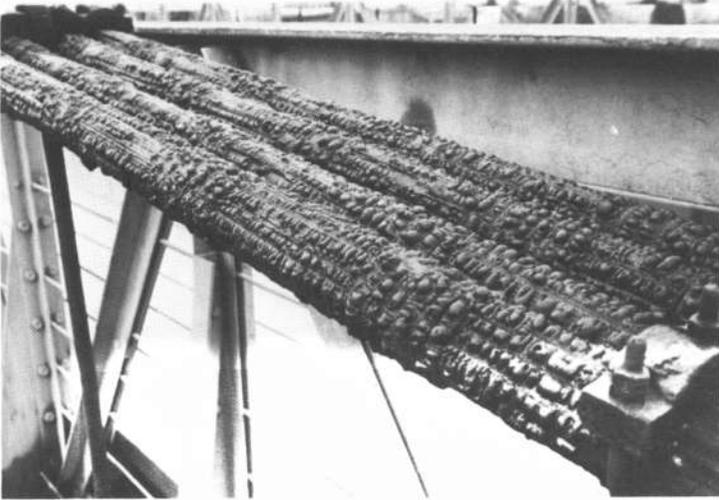
- une couche de zinc époxy,
- une couche d'époxy,
- une couche de polyuréthane,

ou encore deux couches de brai-époxy sur un primaire d'accrochage en époxy. Enfin, on obtient d'excellents résultats d'adhérence avec un système de protection comportant trois couches de polyuréthane, le primaire étant pigmenté au chromate de zinc. Ces produits, parfaitement souples et adhérents, demandent toutefois une préparation de surface particulièrement soignée.

Problèmes de protection des câbles disposés en faisceau.



Ancienne protection de câbles à fils parallèles.

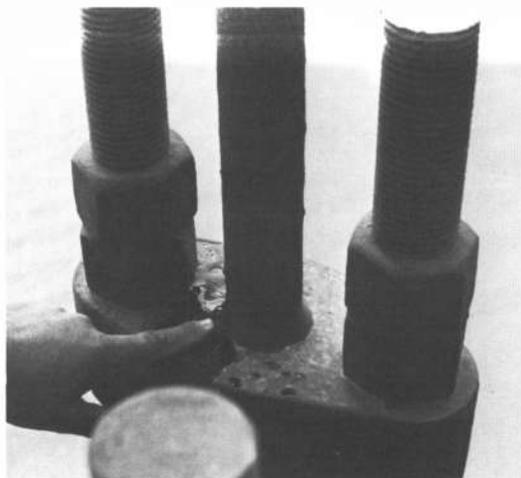


Dégradation de la protection sous attache de suspenste.



Manque d'entretien des ancrages (végétation).

Mauvaise protection à l'entrée du culot.



DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE VIII

LA SURVEILLANCE DES PONTS SUSPENDUS

VIII-1 - INTRODUCTION

La première partie de ce *Bulletin technique*, constituée des chapitres II à VII se présente sous une forme analytique comme une sorte de "Précis d'anatomie critique", détaillant les divers organes avec leurs avantages et leurs inconvénients. La diversité des dispositions constructives adoptées au long des années, due à la fertilité de l'imagination des ingénieurs, de même que la relative complexité de structure des ponts suspendus ont conduit à donner à cette première partie un volume important où il est parfois difficile, pour un ingénieur ayant en charge des ouvrages suspendus, de trouver le renseignement précis dont il a besoin.

La deuxième partie, constituée du présent chapitre VIII, est conçue de façon plus synthétique et tente de dégager les lignes directrices d'une bonne surveillance de pont suspendu, en soulignant les points essentiels et les principes généraux, tout en renvoyant, pour les observations de détails, aux chapitres concernés de la première partie.

VIII-2 - MÉTHODOLOGIE DE VISITE ET D'INSPECTION

La méthodologie de visite et d'inspection d'un ouvrage suspendu résulte des deux causes fondamentales de désordres affectant ce genre d'ouvrage :

- les ponts suspendus sont particulièrement sensibles aux sollicitations dynamiques, en raison de la souplesse de leur structure et du grand nombre de pièces mobiles ;
- les organes de suspension sont sensibles aux effets de la corrosion.

A ces deux causes principales, il convient d'en ajouter d'autres, d'ordre mécanique, telles que des blocages d'organes, dont les conséquences sont amplifiées par le comportement dynamique de la structure.

Il en résulte qu'une anomalie de comportement général de l'ouvrage peut avoir pour cause un désordre local, même apparemment peu grave et que, *a contrario*, il faut souvent rechercher la cause d'un désordre local dans un mauvais comportement global de la structure.

Obéissant à cette démarche, les diverses opérations de surveillance, qui sont détaillées dans le Fascicule 34-sous-fascicule I "Ponts suspendus" de l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (2^e partie), ont pour but d'examiner les points sensibles de l'ouvrage :

- dont le mauvais fonctionnement peut être révélateur ou à l'origine de défauts généraux de comportement ;
- qui sont des endroits préférentiels de localisation de la corrosion.

VIII-3 - OPÉRATIONS TENDANT À APPRÉCIER LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE L'OUVRAGE

Ces opérations sont les suivantes :

- 1 - Examen visuel de l'allure générale du profil en long ou, plus précisément, relevé topographique de l'ouvrage sous charge permanente comprenant le relevé du profil en long et de la position des pylônes et des massifs d'ancrages.

2 – Évaluation de l'égalité des tensions des suspentes par mise en vibration à la main ou, plus précisément, vérification de cette tension par mise en vibration ou pesée au vérin.

3 – Évaluation de la répartition des tensions des câbles de retenue par mise en vibration à la main.

4 – Examen de l'état des attaches de suspentes avec recherche des glissements éventuels.

5 – Examen du tablier avec recherche de déformations.

6 – Examen de l'état des appareils d'appui et de leurs scellements ; vérification de leur fonctionnement.

7 – Examen de l'état des selles d'appui mobiles et vérification de leur fonctionnement.

8 – Examen des zones d'encastrement en pied de pylônes avec recherche de fissures ou d'épaufrures, ou examen de l'état de l'articulation et vérification de son fonctionnement.

Les points 1 à 5 ont pour but essentiel de fournir les éléments de diagnostic du défaut le plus courant affectant les ponts suspendus : le dérèglement de la suspension.

Un abaissement général du profil en long, entraînant une cassure du profil aux extrémités de l'ouvrage, traduit le plus souvent un fluage des câbles porteurs (voir chapitres III-3.2, III-7.2 et III-7.3) ; phénomène naturel, il ne constitue pas un défaut en soi, mais il convient d'y remédier sous peine d'introduire des efforts parasites dans les poutres de rigidité.

L'abaissement du profil peut être corrélatif à un rapprochement des têtes de pylônes dont il convient de rechercher les causes, mais il peut aussi être la conséquence d'un déplacement des massifs d'ancrage, phénomène grave qui doit entraîner des mesures immédiates (voir chapitre IV-4.).

Il est important de noter que les ponts suspendus sont, plus que d'autres ouvrages, sensibles aux effets de la température : une élévation de celle-ci provoque un allongement des câbles, donc un abaissement du profil. Avant de tirer une conclusion quelconque de la comparaison entre divers relevés il convient donc, tout d'abord, de s'assurer que les conditions de températures et d'ensoleillement sont comparables, à défaut d'effectuer une correction, ce qui est une opération malaisée.

L'examen, ou le relevé du profil en long peut aussi révéler l'existence d'une irrégularité plus ou moins localisée. C'est le cas typique d'un dérèglement de suspension, provoqué par un glissement des attaches de suspentes, ou, plus rarement, d'un câble en tête de pylône ; ce type de désordres peut entraîner des avaries sérieuses sur les poutres de rigidité (voir chapitre V-1.4).

A l'origine de ces désordres on trouve les sollicitations dynamiques, notamment au passage de véhicules lourds, qui sont susceptibles d'entraîner des efforts brutaux dans la suspension. Les colliers et attaches de suspentes sur les câbles porteurs sont particulièrement sollicités en partie haute de la parabole près des points fixes, et là où l'angle avec l'horizontale est le plus accusé. Dans le cas des attaches simples il peut se produire, sous l'effet des chocs, des ruptures des ligatures de fixation, suivies de glissement des attaches avec dérèglement de la suspension et report des efforts sur les suspentes voisines. Dans le cas des colliers, le même phénomène de glissement peut se produire, favorisé par la relaxation des boulons de serrage : l'effort de serrage du collier sur le faisceau de câbles diminue dans le temps, réduisant ainsi sa résistance au glissement. Compte tenu de l'effet de réaction en chaîne de ce type de désordre tout au long de la suspension, il est nécessaire de s'assurer du bon positionnement des liaisons suspentes-câbles porteurs et de vérifier périodiquement le serrage des colliers sur les faisceaux (voir chapitre III-6.3).

Les effets de sollicitations dynamiques peuvent également se retrouver au niveau des points d'ancrage des câbles, c'est-à-dire aux culots. Ces derniers, constitués de pièces en fonte, acier moulé ou forgé, peuvent ne pas avoir été remplis correctement en alliage fusible, ou bien celui-ci peut présenter une trop grande ductilité ; il s'ensuit une rentrée du bloc perruque-alliage à l'intérieur du culot et un laminage progressif au niveau de la sortie de câble qui forme filière (voir chapitre III-6.1). Le dérèglement de suspension qui s'ensuit est d'autant plus nocif qu'il n'est pas uniformément réparti sur tous les câbles et qu'il aboutit à des surtensions, par report de charge, sur certains d'entre eux. Il est donc important de surveiller ce point : l'alliage fusible du remplissage doit en principe affleurer la face arrière des culots, et toute rentrée peut être facilement mesurée.

A défaut de pouvoir remettre les choses en état, il est nécessaire de procéder, au plus tôt, à un réglage de la suspension (voir chapitre III-7.4).

La visite des appareils d'appui, visée au point 6, revêt une importance particulière dans la mesure où les désordres constatés peuvent être l'origine ou la conséquence d'un mauvais comportement général de la structure. Le plus souvent sous-dimensionnés par rapport aux actions d'un trafic lourd de plus en plus agressif, ces éléments sont soumis à des efforts tri-directionnels et rapidement variables (voir chapitre VI-1). Il s'ensuit une usure prématurée de ces organes, une augmentation des jeux et, par voie de conséquence, une majoration des sollicitations dynamiques pouvant entraîner un dérèglement de la suspension (voir plus haut). A l'inverse, si le dérèglement de la suspension est préexistant, il en résulte une majoration des efforts appliqués ou une mauvaise répartition de ceux-ci entre les divers appareils d'appui ; les désordres peuvent alors se présenter sous différentes formes : ruptures de scellement, désorganisation de la maçonnerie, cheminement progressif des axes d'articulation... Toute réparation limitée aux seuls appareils d'appui est alors sans effet tant que l'on n'a pas remédié à la cause du phénomène.

Sur un plan plus général, dans les ouvrages anciens, compte tenu de l'évolution actuelle du trafic, on a intérêt, quand une réparation s'impose, à surdimensionner dans la mesure du possible les nouveaux scellements et, le cas échéant, à revoir la conception et procéder au changement des appareils d'appui.

Les organes visés aux points 7 et 8 (selles d'appui mobiles et articulations en pied de pylône) doivent être maintenus en bon état de fonctionnement, leur mobilité conditionnant la bonne transmission des efforts par les câbles porteurs. Leur blocage a deux conséquences :

- surtension dans les câbles d'une part ou de l'autre des pylônes concernés ;
- introduction d'efforts de flexion dans le corps des pylônes et possibilité de désordres graves (voir chapitres III-7.4, IV-3.1, et IV-3.3).

Les dégradations des zones en pied de pylônes encastrés flexibles sont extrêmement rares et peuvent trouver leur origine dans un dérèglement de la suspension ; comme pour les appareils d'appui, toute réparation est illusoire tant que l'on a pas remédié à la cause du phénomène.

VIII-4 - OPÉRATIONS DE DÉTECTION DES DOMMAGES DUS À LA CORROSION

Ces opérations sont les suivantes :

- visite des chambres d'ancrage et recherche d'oxydation au niveau des culots ;
- examen de l'état de la protection des câbles sur toute leur longueur avec recherche de coulures d'oxydes ;
- auscultation électromagnétique des câbles.

Les opérations citées ne concernent que la suspension ; il est évident que la corrosion peut se manifester, par ailleurs, de plusieurs façons : enrouillement des surfaces métalliques, corrosion et gonflement des armatures de béton armé, etc., mais ces phénomènes ne sont pas spécifiques des ponts suspendus et font partie des désordres qu'il est courant de constater sur d'autres types d'ouvrages d'art.

En revanche, la corrosion affectant les câbles porteurs est un phénomène spécifique, de même que les points de localisation de cette dernière. En effet, pour présenter la meilleure résistance possible vis-à-vis de la corrosion, un câble de pont suspendu devrait présenter les caractéristiques suivantes :

- tous les fils constitutifs devraient avoir une longueur identique d'une extrémité à l'autre du câble, afin que les variations de contrainte en service soient identiques dans chaque fil et afin d'éviter les glissements relatifs qui détériorent les produits d'étanchéité placés intérieurement et extérieurement ;
- les fils devraient être jointifs pour présenter un maximum d'étanchéité et éviter la pénétration d'eau ; de plus, les vides interfilaires devraient être de section minimale pour faciliter leur obstruction par les produits placés au moment du câblage, produits qui doivent rester adhérents aux fils, souples, et ne pas fluer pour continuer à obstruer ces vides interfilaires.

Dans la pratique, il n'en est pas ainsi :

- il est très difficile de câbler les fils, par couches successives, avec un pas constant pour une même couche et tout au long d'un câble, en particulier pour les couches extérieures des câbles de fort diamètre ;
- les câbles de fort diamètre présentent des vides entre fils extérieurs et, dans tous les cas, les vides entre fils à l'intérieur d'un câble sont tous en com-

munication les uns avec les autres par couronne. Même dans le cas des câbles clos, à fils périphériques profilés, le passage sur selles d'appui provoque un infléchissement et une ovalisation tendant à écarter les fils en partie supérieure ; en partie centrale, on retrouve des fils ronds laissant circuler l'eau. Par ailleurs, les produits noirs, couramment utilisés dans les anciens câbles, ne remplissent pas les conditions requises et, par forte température, la protection intérieure dégoutte sous les câbles.

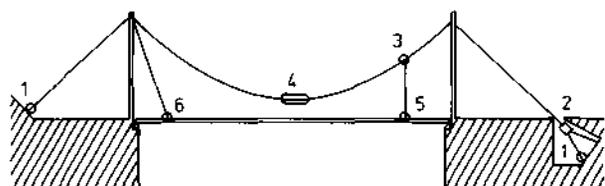


Fig. VIII-1- Zones préférentielles de corrosion.

En conséquence, les câbles constituant la suspension sont le siège d'une circulation d'eau permanente due à l'infiltration des eaux de pluie et à la condensation ; cette circulation n'est pas néfaste en elle-même, mais la corrosion est provoquée par le séjour prolongé de l'eau en certaines zones préférentielles qui sont les suivantes (fig.VIII-1) :

- 1 - bas des câbles de retenue, près des culots, particulièrement dans les chambres d'ancrage humides (voir chapitre III-6.1) ;
 - 2 - intérieur des colliers d'épanouissement, dans le cas de disposition géométrique des câbles en faisceau ou en couronne (voir chapitre III-6.6) ;
 - 3 - intérieur des colliers sur câbles, au droit de l'attache haute des suspentes (voir chapitre III-6.3) ;
 - 4 - partie basse de la parabole ;
 - 5 - bas des suspentes en câble, près des culots (voir chapitre III-6.4) ;
 - 6 - bas des haubans, près des culots ;
- accessoirement, intérieur des faisceaux lorsque l'évacuation de l'eau en partie basse n'est pas correctement assurée (voir chapitre III-4.2).

En dehors de ces points, et sachant qu'il est impossible d'obtenir des câbles parfaitement étanches, il convient de favoriser au maximum l'évacuation rapide des eaux d'infiltration. Le moyen le plus efficace est, sans conteste, la ventilation naturelle des câbles qui permet l'évaporation accélérée de l'eau ayant pénétré à l'intérieur. En effet, l'eau s'évacue par cheminement périphérique et évaporation dans l'air extérieur moins saturé d'humidité. Si l'air est

chaud et s'il y a du vent l'évaporation est accélérée et rapide. Il convient donc que les câbles soient disposés sur toute leur longueur et, le plus souvent possible, à l'action de l'air sec et renouvelé et à la chaleur du soleil.

Cela peut paraître une évidence, mais la pratique montre que ces dispositions ne sont pas toujours respectées, en particulier :

- dans les chambres d'ancrage fermées, humides avec air non renouvelé et saturé d'humidité, où l'eau de condensation sur les voûtes goutte sur les câbles ;
- aux abords des ouvrages, où la végétation, faute d'entretien, est souvent abondante et où les arbres freinent considérablement la ventilation, diminuent l'ensoleillement, entretiennent l'humidité et favorisent la condensation matinale ;
- près des dispositifs d'accrochage des selles d'infléchissement en tête de chambre qui retiennent l'eau, les poussières et les boues.

L'entretien courant consiste à élaguer la végétation parasite aux abords des ouvrages ; des améliorations peuvent être apportées dans certains cas :

- s'il n'y a pas d'arrivée d'eau dans les chambres d'ancrage, il peut être facile de créer des ventilations efficaces, avec orifices d'entrée et de sortie d'air de grande section et décalés le plus possible en hauteur ;
- si l'eau séjourne dans les chambres d'ancrage ou s'il n'est pas possible de créer une ventilation efficace, il convient alors de reporter les culots d'ancrage à l'extérieur, à l'air libre, l'ancrage au massif se faisant à l'aide de tirants noyés dans le béton (voir chapitre III-8.4).

Hormis ces points qui peuvent être améliorés, des problèmes demeurent au niveau des colliers d'attache sur faisceaux et des colliers d'épanouissement. A défaut d'autre solution, il est nécessaire de renforcer la protection anticorrosion à l'intérieur de ces colliers, quitte à adopter une solution coûteuse qui ne sera pas généralisée sur l'ensemble de la suspension. Un démontage est alors nécessaire, relativement aisé dans le cas de colliers d'attaches, beaucoup plus difficile dans le cas des colliers d'épanouissement.

En tout état de cause, les câbles de suspension doivent faire l'objet d'une inspection minutieuse où l'on notera l'état de la protection extérieure, les détachements, écarts entre fils ou fils cassés créant autant d'entrées d'eau, les coulures d'oxyde et les suintements. Il faut retenir qu'en présence d'une

protection extérieure dégradée, un câble apparemment sain extérieurement peut être fortement corrodé à l'intérieur. Lorsque la corrosion se manifeste par un gonflement du câble, il est trop tard et le remplacement de celui-ci s'impose à court terme.

Des méthodes physiques, telles que l'auscultation électromagnétique, détaillée en annexe, permettent, à l'heure actuelle, d'évaluer le degré d'oxydation interne des câbles, et de détecter la présence de zones où se trouvent des ruptures de fils. Bien qu'en l'état actuel de la technique les renseignements donnés ne sont pas quantitatifs, le résultat qualitatif d'une inspection permet, complété le cas échéant par une opération de surveillance acoustique (voir chapitre VIII-6), de prononcer un diagnostic fiable sur l'état de santé interne des câbles de ponts suspendus.

VIII-5 - AUTRES OPÉRATIONS DE SURVEILLANCE ET D'ENTRETIEN

Bien que revêtant une moins grande importance vis-à-vis du comportement général de la structure ou de sa durabilité, certains autres points méritent d'être surveillés et entretenus, une négligence prolongée à leur égard pouvant avoir, à terme, des conséquences fâcheuses :

- les joints de chaussées qui, au même titre que les appareils d'appui sont soumis à des sollicitations dynamiques importantes ; en outre, un blocage de joint de chaussée peut être révélateur d'un dérèglement de suspension entraînant une mise en butée du tablier ;
- les dispositions constructives annexes aux câbles constituant la suspension : culots et brides des suspentes en câbles, articulations basses des suspentes en barres, étriers et tirants d'attache des culots ; en bref, tous les endroits où l'eau, les poussières peuvent entrer et s'accumuler sans possibilité d'évacuation, favorisant ainsi les phénomènes de corrosion.

VIII-6 - MOYENS EXCEPTIONNELS DE SURVEILLANCE

Lorsque de nombreuses ruptures de fils sont constatées sur les câbles constituant la suspension d'un ouvrage, ou que les diagrammes d'auscultation électromagnétique relatifs à la détection des fils rompus présentent des perturbations importantes, il convient de mettre l'ouvrage sous surveillance

acoustique. Cette méthode, que l'on trouvera détaillée en annexe 4, utilise le fait qu'une rupture s'accompagne d'une libération d'énergie et provoque une "onde de choc" qui se propage le long des câbles. Ces ondes de choc sont détectées par des accéléromètres fixés sur les câbles à l'aide de colliers et transmises à une armoire centralisatrice qui procède à un traitement de données. L'analyse des résultats qui comportent l'amplitude des ondes reçues et les temps de passage sous les capteurs permet d'identifier les ruptures et de les localiser.

Les principes de la méthodologie de mise en oeuvre des opérations d'auscultation électromagnétique et de surveillance acoustique peuvent être définis comme suit :

Première phase

Auscultation des câbles d'un ouvrage par les deux méthodes, oxydation et fils rompus :

- premier cas : les diagrammes d'auscultation relatifs à la détection des fils rompus ne présentent pas, ou présentent peu d'anomalies. Il convient alors de suivre l'évolution du phénomène de corrosion généralisée, évolution lente pour laquelle une périodicité d'auscultation de cinq ans semble suffisante ;
- deuxième cas : les diagrammes d'auscultation relatifs à la détection des fils rompus présentent des perturbations. Suivant l'importance de celles-ci, on peut décider, soit de s'en tenir à une périodicité d'auscultation annuelle afin de suivre l'évolution du phénomène, soit de passer à la deuxième phase.

Deuxième phase

Mise sous surveillance acoustique de l'ouvrage : décidée lorsque les diagrammes d'auscultation sont très perturbés, la mise en oeuvre de cette méthode est destinée à apprécier la vitesse d'aggravation du phénomène de fissuration par corrosion sous contrainte. Pour être valable, la durée de surveillance doit être d'au moins six mois. Suivant le nombre d'événements enregistrés on peut alors :

- décider qu'il n'y a pas danger immédiat et programmer une nouvelle période de surveillance un an à dix-huit mois plus tard ;
- décider du changement de suspension avec, suivant la gravité, diverses modalités :
- limitation de l'ouvrage en charge,
- fermeture totale à la circulation,
- mise en place d'une suspension de secours

lorsque l'ouvrage risque de s'effondrer sous son poids propre.

Appliquée avec discernement, cette méthodologie permet de porter un diagnostic sur un ouvrage sans risque majeur d'erreur.

VIII-7 - VÉRIFICATIONS PARTICULIÈRES

Les investigations menées à la suite de l'effondrement du pont de Sully-sur-Loire semblent montrer qu'il peut se produire, particulièrement sur des ouvrages construits pendant la Seconde Guerre mondiale ou immédiatement après, qu'en raison de la médiocre qualité des aciers fabriqués à cette époque, certains éléments (étriers d'attache de culots, barres de suspentes, etc.) soient constitués d'un métal intrinsèquement fragile, c'est-à-dire particulièrement sensible à l'effet d'entaille et n'opposant pratiquement aucune résistance à la propagation d'un défaut (fissure, par exemple). Par grand froid, cette fragilité est encore augmentée et un faible rayon en fond de filetage peut constituer le défaut initial, aggravé par l'augmentation de contraintes due au raccourcissement général de la suspension. On risque alors d'assister à des ruptures brutales pouvant entraîner une réaction en chaîne et un effondrement catastrophique de l'ouvrage.

En l'absence de documents permettant d'établir avec certitude la nature des aciers constitutifs de ces éléments, il est prudent de faire procéder par un service spécialisé à une identification de ceux-ci (analyse chimique et caractéristiques mécaniques).

Dans le cas de résultats défavorables, notamment concernant les caractéristiques de résilience, il peut être opportun d'envisager, d'une part des mesures particulières d'exploitation de l'ouvrage, d'autre part un programme de remplacement des éléments douteux.

VIII-8 - MOYENS D'ACCÈS

La surveillance des ponts suspendus implique bien évidemment l'examen et donc l'accès à tous les points névralgiques de ces ouvrages (suspension, tablier, appareils d'appui, etc.).

Nous classerons ces moyens d'accès en trois familles :

- 1 - propres à l'ouvrage,
- 2 - extérieurs à l'ouvrage,
- 3 - ascension en l'absence de tous moyens d'accès.

VIII-8.1 - Moyens d'accès propres à l'ouvrage

L'existence d'échelles scellées sur le flanc ou à l'intérieur des pylônes est fréquente. De telles dispositions facilitent par un accès aisé l'examen des selles, des câbles, et de leurs attaches (culots, étriers, etc.) en partie haute.

La plupart des ponts suspendus sont équipés de passerelles de visite fixées sous le tablier et se déplaçant sur des chemins de roulement liés généralement aux poutres de rigidité. Exception faite de très grands ouvrages où ces passerelles sont munies de moteurs à essence, le déplacement est obtenu manuellement, soit en actionnant un système d'avancement par manivelle, soit en prenant appui sur les entretoises, directement ou par l'intermédiaire de gaffes si celles-ci sont trop espacées. Ces passerelles sont indispensables pour l'exécution d'une visite détaillée de l'intrados des ouvrages (poutraison principale et secondaire, dalle ou platelage), des systèmes de liaison suspentes-tablier, des appareils d'appui sur pile ou culée..

Elles sont également très utiles pour tous travaux de réparation et d'entretien (peinture, nettoyage des appuis, etc.) et il est regrettable que la totalité des ouvrages n'en soit pas munie car leur coût serait très rapidement récupéré par les économies réalisées sur les échafaudages nécessaires à l'exécution de ces travaux.

Certains grands ouvrages (Bordeaux, par exemple) ont des faisceaux de câbles de grandes dimensions et l'installation d'une main courante sur le faisceau de câbles permet une visite et un entretien des câbles beaucoup plus faciles.

VIII-8.2 - Moyens d'accès extérieurs à l'ouvrage

Si les dispositifs décrits ci-dessus sont très intéressants, ils n'existent pas sur tous les ouvrages ou, s'ils existent, ils ne permettent pas l'examen de toutes les parties de l'ouvrage. Des moyens d'accès complémentaires sont donc nécessaires, et parmi ceux-ci on citera :

- les échelles de pompier assez facilement disponibles à proximité de l'ouvrage. Elles sont en général montées sur remorque très légère et de maniement facile, permettant l'ascension à 20 m environ (il est vraisemblable que toutes les unités de pompiers n'ont pas le même matériel et que les capacités du matériel peuvent être variables). L'inconvénient de ce type de matériel est sa fixité, c'est-à-dire que tout mouvement (rotation, montée,

descente, etc.) implique l'absence de personnel sur l'échelle ;

– les nacelles élévatrices montées sur véhicules qui peuvent être mises à disposition par les services de l'Équipement (matériel servant à l'élagage et géré par le Parc, par exemple), les collectivités locales (matériel d'entretien de l'éclairage), l'EDF ou certaines entreprises spécialisées. Ces matériels ont pour avantage une plus grande souplesse d'utilisation (montée, descente, rotations sont possibles et commandées par le visiteur). D'autre part, le visiteur est dans une nacelle et non plus sur une échelle ce qui augmente sa sécurité et sa liberté de manoeuvre. Par contre, le véhicule porteur (tracteur ou souvent camion) encombre l'ouvrage et souvent empêche toute circulation. De plus, son poids doit être compatible avec la capacité de l'ouvrage visité.

Parmi les autres moyens d'accès, nous citerons :

– le bateau pour accès aux piles en rivière, examen des appareils d'appui (à l'aide d'échelles), examen de la poutraison et de la dalle dans le cas d'absence de nacelle (une telle visite à l'aide de jumelles est préférable à pas de visite du tout) ;

– des échelles diverses (rigides ou de corde) pour accès et examen des appareils d'appui (depuis la berge ou depuis le tablier), accès aux têtes de pile, etc.).

VIII-8.3 - Ascension en l'absence de tous moyens d'accès

Malgré l'inventaire des moyens d'accès ci-dessus, il arrive fréquemment que la seule solution reste l'ascension le long des câbles.

Bien que cette opération ne soit pas très facile, il apparaît que pour un ouvrage "normal" (câbles non jointifs de diamètre maximal 80 à 90 mm et pente pas trop élevée), elle ne demande ni aptitudes physiques ni entraînement particulier, sous réserve de non-sensibilité au vertige et de respect des règles de sécurité qui sont précisées ci-dessous.

Il convient cependant de noter que les difficultés sont nettement plus importantes en cas de câbles mouillés, givrés, ou par temps froid.

VIII-8.4 - Sécurité et précautions à prendre

Nous allons examiner pour chaque moyen d'accès les précautions à prendre :

Échelles fixées au pylône

– Vérifier l'état des scellements et la corrosion des barreaux ou montants (qui peut être telle que l'échelle se rompe).

– Ces échelles devraient (ce n'est que rarement le cas) être munies de crinolines.

– Lorsque les échelles sont extérieures, le plus souvent elles sont interrompues en partie basse pour ne pas engager le gabarit ; une échelle d'accès est alors nécessaire et se trouve installée sur la chaussée ; il est donc indispensable de prévoir une protection vis-à-vis de la circulation.

– Enfin, il arrive que le visiteur "dérange" les "occupants" habituels de l'ouvrage (chauve-souris, oiseaux ayant niché dans les selles ou colliers) et l'effet de surprise peut provoquer chez le visiteur des réactions dangereuses et même très dangereuses, lorsque c'est un nid de guêpes qui est dérangé !

Passerelles de visite

Il faut :

– s'assurer de l'état du plancher (généralement en bois et fréquemment pourri),

– se prémunir contre les risques de déraillement.

Les systèmes de roulement sont constitués de profils en U dans lesquels sont placées les roues. Si, en cours de translation, il y a un blocage sur un côté, la passerelle se met "en travers" et un déraillement est toujours à craindre.

Ce déraillement n'a pas de conséquences fâcheuses si la passerelle est munie d'un système très simple (une pièce métallique coudée) la maintenant suspendue au rail, mais peut devenir très dangereux car le plus souvent la passerelle est purement et simplement suspendue par ses quatre roues.

Pour remédier à ce risque il est recommandé de balayer au préalable les chemins de roulement, de bien lubrifier les axes des roues avant chaque visite, et de bien synchroniser les mouvements d'avance.

Enfin, il serait vivement souhaitable que toutes les passerelles soient équipées de dispositifs de retenue en cas de déraillement.

Échelles de pompier

Ce sont des matériels fiables et dont les limites d'utilisation sont annoncées et affichées avec précision.

Les seuls risques à craindre sont donc :

- au moment du "transfert" échelle-ouvrage, du fait de la souplesse de l'échelle à son extrémité ; dans ce cas, il est conseillé de s'accrocher à un élément de l'ouvrage à l'aide d'une ceinture de sécurité avant d'effectuer ce transfert ;
- les risques dus à la circulation, pour lesquels toutes les règles en matière de signalisation sont à respecter scrupuleusement car le moindre choc, même bénin, d'un véhicule, peut avoir des conséquences catastrophiques pour une personne située sur l'échelle.

Échelles élévatrices montées sur véhicule

Aux précautions à prendre vis-à-vis de la circulation déjà citées pour les échelles de pompier, il convient d'ajouter la vérification de la résistance de l'ouvrage :

- ponctuellement : les vérins de stabilisation ne doivent être appliqués que sur des parties d'ouvrage pouvant les supporter (faire attention aux trottoirs en particulier) ;
- globalement : le poids de l'engin doit être compatible avec les limitations de charge de l'ouvrage.

Échelles

Les échelles doivent être en bon état et conformes à la réglementation en vigueur (1), (2) ; pour le cas particulier des ponts suspendus, l'attention doit plus particulièrement porter sur :

- leur stabilité, car la configuration du site ne permet pas toujours de leur donner une pente suffisante,
- les risques d'accidents dus à un choc de véhicule.

Visites en bateau

Les précautions élémentaires sont d'avoir un bateau en bon état et adapté au plan d'eau sur lequel il doit être utilisé. Le port du gilet de sauvetage est bien entendu obligatoire.

Ascension en l'absence de tous moyens d'accès

Dans ce cas, il ne peut s'agir que de mesures de protection individuelles et en l'occurrence : ceintures ou baudriers de sécurité et casques.

Rappelons que l'utilisation d'une ceinture ou d'un baudrier de sécurité est réglementairement (1) obligatoire, que "ces appareils ne doivent pas permettre une chute libre de plus de un mètre, à moins qu'un dispositif approprié ne limite aux mêmes effets une chute de plus grande hauteur". D'autre part, "lorsque la protection d'un travailleur ne peut être assurée qu'au moyen d'une ceinture ou d'un baudrier de sécurité, jamais ce travailleur ne doit demeurer seul sur le chantier".

L'utilisation de tels appareils pour la visite des ponts suspendus est facilitée par les points d'attache continus que forment les câbles. Cependant, la présence des suspentes oblige à détacher la longe du câble ; pour qu'il n'y ait pas d'interruption dans la protection du visiteur, il est donc recommandé que celui-ci s'équipe d'une ceinture ou d'un baudrier muni de deux langes, de manière à en avoir toujours une attachée au câble.

Si l'utilisation du casque ne pose que peu de problèmes pour la visite de la poutraison à l'aide de la nacelle (risque de chocs contre les profilés, étriers, etc.), il n'en va pas de même pour la visite de la suspension lorsqu'elle se fait en se déplaçant sur le câble ; le visiteur n'étant pas en position verticale, le casque constitue une gêne, et le plus souvent ne reste pas longtemps en place. Un casque (muni d'une jugulaire) est malgré tout nécessaire, car en cas de chute il protège la tête des heurts contre les pièces métalliques de l'ouvrage.

(1) Décret 65-48 du 8 janvier 1965.

(2) Circulaire du 29 mars 1965, relative à l'application du décret 65-48.

TROISIÈME PARTIE

ANNEXES

ANNEXE 1

DOCUMENTATION BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] GAVARNI C., *Considérations sur le calcul des ponts suspendus*, Acier - stahl - steel, n° 3 et n° 4, 1961.
- [2] COURBON J., *Cours de résistance des matériaux*, Chap. XXVII : ponts suspendus à poutre de rigidité, 3e ed. Dunod, 1971, 1622 p.
- NAVIER L. M. H., *Mémoire sur les ponts suspendus*, 2e ed., Carilian-Goeury, Paris, 1830.
- JULIEN C., Note sur quelques propriétés du polygone qui affecte la chaîne d'un pont suspendu, *Ann. P. et Ch.*, 1re série, 1er semestre, 1837, pp. 133-167.
- CROIZETTE-DESNOYERS Ph., *Cours de construction des ponts*, t. II, Cha. XII, Vve Ch. Dunod, 1885, 45 planches, 1204 p.
- AMOUROUX D., Lemoine B., L'âge d'or des ponts suspendus en France 1823-1850, *Ann. P. et Ch.*, 19, 3e trimestre 1981, pp. 53-63.
- MINISTÈRE des TRANSPORTS DRCR, *Défauts apparents des ouvrages d'art métalliques*, Doc. LCPC-SETRA, 1981, 68 p.
- MÉHUE P., Platelage des ponts et passerelles métalliques, *Bull. ponts métalliques*, 9, 1983, pp. 55-80.
- NIELS J. GIMSING, *Cable supported bridge. Concept and design*, John Wiley and Sons, New-York, 1983.
- CÉFRACOR groupe de travail de la Commission d'étude "protection par revêtements", 4, Résistance à la corrosion de matériaux exposés en atmosphères naturelles et en atmosphères synthétiques, *Matériaux et Techniques*, mars-avr. 1983, pp. 71-78.
- MINISTÈRE de L'ÉQUIPEMENT, du Logement, de l'aménagement du territoire et du transport, Direction des Routes, *Nomenclature des parties d'ouvrages métalliques*, Doc. LCPC-SETRA, 1986, 132 p.
- GOURMELON J.-P., Point de vue. Matière à réflexion pour une politique de gestion des ponts suspendus par temps froid, *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, 156, juil.-août 1988, pp. 105-107.

ANNEXE 2

LISTE DES TEXTES RÉGLEMENTAIRES CONCERNANT LA SURVEILLANCE ET L'ENTRETIEN DES PONTS SUSPENDUS (ANCIENS ET NOUVEAUX)

- Circulaire série A n° 2 du 17 mars 1936, *Surveillance et entretien des ponts métalliques et des ponts suspendus*. Direction du personnel, de la comptabilité et de l'administration générale, 3^e bureau.
- Instruction provisoire du 23 novembre 1966, *Instruction provisoire sur la protection des ouvrages métalliques contre la corrosion*. Direction des routes et de la circulation routière. Service des ouvrages d'art et des activités opérationnelles d. 11-181, circulaire n° 76 T P 156 et 157.
- Circulaire n° 72.96 du 29 juin 1972, *Relative à la surveillance et à l'entretien des ponts suspendus, ponts à haubans et ouvrages analogues*. Direction des routes et de la circulation routière CTOA en RIN O d. 12-947.
- Circulaire CTOA et REG 2 d. 13.774 du 17 juillet 1974, *Renforcement des actions de surveillance et d'entretien des ouvrages d'art ; complément pour le domaine des ponts, viaducs et ouvrages analogues*. Direction des routes et de la circulation routière.
- Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art, *Ponts suspendus et à haubans*, 2^e partie, fasc. 34, mars 1986.
- Lettre circulaire, ministères de l'Intérieur et de l'Équipement, 8 août 1988, *Surveillance technique des ponts suspendus*.

ANNEXE 3

LISTE DES PONTS SUSPENDUS FRANÇAIS
ARRÊTÉE AU 1^{ER} JUILLET 1987

Nota : depuis l'établissement de cette liste et suite à l'effondrement du pont de Sully-sur-Loire, un certain nombre d'ouvrages ont été mis hors service et reconstruits.

Département	Ouvrage	Voie portée	Obstacle franchi
01 Ain	Beauregard	CD 44	Saône
	Groslee	CD 60	Rhône
	Montmerle	CD 27	Saône
	Seyssel	CD 992	Rhône
	Yenne-Nattages (voir aussi 73)	CD 40	Rhône
02 Aisne	Vaux	CD 967	Voies SNCF
03 Allier	Néant		
04 Alpes-de-Haute-Provence	Archidiacre	CD 4	Durance
	Fonbeton	CD 4	Durance
	Manosque	CD 907	Durance
	Volonne	CD 404	Durance
05 Hautes-Alpes	Néant		
06 Alpes-Maritimes	Massoins	CD 126	Var
	Saint-Léger	CD 316	Roudoule
07 Ardèche	Andance	CD 86 B	Rhône
	Aubenas : pont de Ville	RN 102	Ardèche
	Cros-de-Géorand	CD 160	Loire
	La Voulte	CD 86 F	Petit Rhône
	La Voulte	CD 86 F	Rhône
	Saint-Martin-d'Ardèche	CD 201	Ardèche
	Passerelle de Tournon	CD 219	Rhône
	Tournon : pont G. Toursier	RN 95	Rhône
Viviers	CD 86 I	Rhône	
08 Ardennes	Charleville-Mézières : - passerelle du Moulin	urbaine	Meuse
09 Ariège	Passerelle de Ledar	privée	Lez
10 Aube	Néant		
11 Aude	Néant		
12 Aveyron	La Devèze (voir aussi 15)	CD 537	Brezou
	Livinhac-le-Haut	CD 21	Lot
	Phalip	CD 97	Truyère
	Verdalle	CD 510	Tarn
13 Bouches-du-Rhône	Chartreuse	privée	Rhône-bras mort
	Fourques	CD 35 A	Petit Rhône
	Mallemort	CD 23 A	Durance
	Mirabeau	RN 96	Durance
	Pertuis	CD 956	Durance
	Rognonas	RN 570	Durance

Département	Ouvrage	Voie portée	Obstacle franchi
14	Calvados	Néant	
15	Cantal	La Devèze (voir aussi 12) Saint-Projet	CD 34 Dordogne-barrage de Sarrans
		Tréboul	CD 682 Dordogne-barrage de l'Aigle
		Vernejoux	CD 56 Dordogne-barrage de Sarrans
			CD 15 Dordogne-barrage de l'Aigle
16	Charente	Néant	
17	Charente- Maritime	Transbordeur du Martrou Tonnay-Charente	commun. Charente
18	Cher	Le Guétin (voir aussi 58) Mornay (voir aussi 58)	CD 976 Allier
			RN 76 Allier
19	Corrèze	Basteyroux Chambon Lapleau : Rochers Noirs Merle	commun. CD 13 Marrone
			CD 89 E Dordogne
			CD 13 Luzège
			Maronne
20	Corse	Néant	
21	Côte-d'Or	Néant	
22	Côtes-du-Nord	Lézardrieux Tréguier - Passerelle Saint-François	CD 786 Trieux
			commun. Goindy
23	Creuse	Saint-Marien	commun. Tardes
24	Dordogne	Sainte-Foy-la-Grande (voir aussi 33) Sainte-Foy-la-Grande - passerelle de Lardin	CD 936 Dordogne
			Dordogne
25	Doubs	Roset-Fluans	CD 106 Doubs
26	Drôme	Donzère Eymeux Gournier Le Teil Pierrelatte Pierrelatte	CD 86 J Rhône
			CD 325 Isère
			CD 237 Canal CNR
			RN 102 Rhône
			CD 538 Canal CNR
			CD 59 Canal CNR
27	Eure	Les Andelys	CD 135 Seine
28	Eure-et-Loir	Néant	
29	Finistère	Terenez	CD 791 Aulne
30	Gard	Moussac (piétons) Remoulins Roquemaure Saint-Gilles Brignon	CD 942 Gardons réunis
			RN 86 Gardons réunis
			CD 976 Rhône
			RN 572 Petit Rhône
			CD 7 Gardons réunis

Département	Ouvrage	Voie portée	Obstacle franchi
31 Haute-Garonne	Bessières	CD 32	Tarn
	Boussens	privée	Garonne
	Buzet	CD 22	Tarn
	Capens	CD 622	Garonne
	Fourg	CD 13	Garonne
	Layrac	CD 15	Tarn
	Mazères	CD 52	Salat
	Mirepoix	CD 71	Tarn
	Roquefort	CD 13 E	Salat
Villemur	CD 14	Tarn	
32 Gers	Riscle	CD 935	Adour
33 Gironde	Bordeaux : pont d'Aquitaine	RN 210	Garonne
	Coutras	CD 10	Dronne
	Gué-de-Senac	CD 122	Dronne
	La Reole	CD 9	Garonne
	Saint-Denis-de-Pile	CD 22	Isle
	Sainte-Foy-la-Grande (voir aussi 24)	CD 936	Dordogne
34 Hérault	Canet	CD 2	Hérault
	Cessenon	CD 136	Orb
	Gaston-Doumergue	CD 16	Orb
	Lagamas	CD 9	Hérault
	Pailhès	CD 32 E	Hérault
	Poujol	CD 160	Orb
	Saint-Bauzille-de-Putois	CD 108	Hérault
	Saint-Thibéry (passerelle)	privée	
Tarassac	CD 14	Orb	
35 Ille-et-Vilaine	Port Saint-Jean - port Saint-Hubert	CD 36	Rance
36 Indre	Néant		
37 Indre-et-Loire	Langeais	CD 57	Loire
	Tours (passerelles)		
	- Saint-Symphorien Nord - Saint-Symphorien Sud	urbaine urbaine	Loire Loire
38 Isère	Brion	CD 34	Ebron
	Iseron	CD 32	Isère
	Grenoble : pont Saint-Laurent	urbaine	Isère
	Serrières	RN 82	Rhône
	Sone	CD 71	Isère
	Tencin	CD 30	Isère
	Trellins	CD 22	Isère
	Veurey	CD 3	Isère
	Vienne - Sainte-Colombe	urbaine	Rhône
39 Jura	Néant		
40 Landes	Vimport	CD 13	Adour
41 Loir-et-Cher	Néant		
42 Loire	Pertuiset	CD 3	Loire
43 Haute-Loire	Chilhac	CD 41	Allier
	Confolens	CD 461	Allier
	Lamothe	h. exp.	Allier
	Margeaix	CD 26	Loire
	Saint-Ilpize	CD 22	Allier

Département	Ouvrage	Voie portée	Obstacle franchi	
44	Loire-Atlantique	Ancenis	CD 763	Loire
		Varades	CD 752	Loire
45	Loiret	Bonny-sur-Loire	CD 926	Loire
		Châteauneuf-sur-Loire	CD 11	Loire
		Châtillon-sur-Loire	CD 50	Loire
		Jargeau	CD 921	Loire
		Meung-sur-Loire	CD 18	Loire
46	Lot	Albas	CD 37	Lot
		Bouziès	CD 40	Lot
		Cajarc	CD 17	Lot
		Carennac	CD 20	Dordogne
		Castelfranc	CD 45	Lot
		Douelle	CD 12	Lot
		Floirac	CD 80	Dordogne
		Gaillac	CD 19	Lot
		Gluges	RN 140	Dordogne
		Juillac	CD 67	Lot
		Mols	CD 703	Dordogne
		Puy-L'Évêque	CD 44	Lot
		Touzac	CD 8	Lot
47	Lot-et-Garonne	Agen (passerelle)	urbaine	Garonne
		Marmande	CD 933	Garonne
		Mas - d'Agenais	CD 6	Garonne
		Roussanes	CD 911	Lot
		Saint-Nicolas-de-la-Balerme	CD 114	Garonne
		Sauveterre-Saint-Denis	CD 308	Garonne
Vianne	CD 642 E	Baïse		
48	Lozère	Néant		
49	Maine-et-Loire	Bouchemaine	CD 112	Maine
		Chalennes	CD 961	Loire
		Gennes	CD 751b	Loire
		Ingrandes	CD 6	Loire
		Les Rosiers	CD 751b	Loire
		Montjean	CD 15	Loire
50	Manche	Néant		
51	Marne	Dormans	CD 18	Marne
52	Haute-Marne	Néant		
53	Mayenne	Néant		
54	Meurthe-et-Moselle	Pompey (2 passerelles)		
55	Meuse	Néant		
56	Morbihan	La Roche-Bernard	RN 165	Vilaine
		Le Bono	commun.	Bono
		Lorois	CD 781	Etel
		Redon : La Gicquelais	commun.	Cal Nantes-Brest
57	Moselle	Bousse (passerelle)		Moselle
		Hauconcourt : pont Rapilly	CD 52	Moselle
58	Nièvre	Cosne	CD 955	Loire
		Le Guétin (voir aussi 18)	CD 976	Allier
		Mornay (voir aussi 18)	RN 76	Allier

Département	Ouvrage	Voie portée	Obstacle franchi
59	Nord	Néant	
60	Oise	Boran-sur-Oise La Croix-Saint-Ouen Le Plessis-Brion Précy-sur-Oise Saint-Leu-d'Esserent	CD 924 CD 98 CD 15 CD 17 CD 44 Oise Oise Oise Oise Oise
61	Orne	Néant	
62	Pas-de-Calais	Néant	
63	Puy-de-Dôme	Auzat-sur-Allier (passerelle) Coudes Parentignat	CD 229 h. exp. Allier Allier Allier
64	Pyrénées-Atlantiques	Assat Halzarte Lacq-Abidos	CD 437 commun. CD 31 Gave de Pau Nive Gave de Pau
65	Hautes-Pyrénées	Néant	
66	Pyrénées-Orientales	La Cassagne Rivesaltes	SNCF CD 5 Agly
67	Bas-Rhin	Néant	
68	Haut-Rhin	Néant	
69	Rhône	Chasse Condrieu Couzon-au-Mont-d'Or Feyzin : pont de l'allée du Rhône Ile Barbe Lyon : - passerelle Mazaryk - passerelle Saint-Vincent - passerelle Saint-Georges - passerelle du Collège Solaize Vernaizon Vienne : passerelle Sainte-Colombe	CD n. r. CD 28 CD n. r. comm. urbaine CD n. r. urbaine urbaine urbaine urbaine CD 36 CD 36 urbaine Rhône Rhône Saône Canal CNR Saône Saône Saône Rhône Canal CNR Rhône Rhône
70	Haute-Saône	Néant	
71	Saône-et-Loire	Néant	
72	Sarthe	Néant	
73	Savoie	Yenne-Nattages (voir aussi 01)	CD 40 Rhône
74	Haute-Savoie	L'Abîme La Caille Morzine (passerelle)	CD 31 CD 41 Chéran Les Ussets Dranse de Morzine
75	Seine	Paris (3 passerelles) - Buttes Chaumont - Lac Daumesnil (Reuilly et Bercy)	Lac du Parc des Buttes Chaumont Lac Daumesnil

Département	Ouvrage	Vole portée	Obstacle franchi
76	Seine-Maritime Elbeuf : pont Guynemer Tancarville	CD 7 RN 182	Seine Seine
77	Seine-et-Marne Esbly Les Roazes	commun. commun.	Cal de Chalifert Cal de Chalifert
78	Yvelines Triel	CD 2	Seine
79	Deux-Sèvres Néant		
80	Somme Néant		
81	Tarn Saint-Sulpice Viterbe	CD 631 CD 149	Agout Agout
82	Tarn-et Garonne Auvillar Belleperche Bourret Cazals Coudol Feneyrols Lamagistère Saula Trescasses Verdun Villebrumier	CD 11 CD 14 CD 928 CD 75 b. CD 15 CD 102 CD 30 CD 45 CD 12 CD 6 CD 21	Garonne Garonne Garonne Aveyron Garonne Aveyron Garonne Tarn Garonne Garonne Tarn
83	Var Néant		
84	Vaucluse Bollène Bollène Sorgues : pont des Armeniers	CD 994 CD 44 h. exp.	Cal de Donzère Cal de Donzère Rhône-bras mort
85	Vendée Néant		
86	Vienne Bonneuil Matours Vicq-sur-Gartempe	CD 3 CD 5	Vienne Gartempe
87	Haute-Vienne Néant		
88	Vosges Néant		
89	Yonne Cézy	CD 134	Yonne
90	Territoire - de - Belfort Néant		
91	Essonne Néant		
92	Hauts-de-Seine Néant		
93	Seine-Saint-Denis Néant		
94	Val-de-Marne Vitry-sur-Seine : Port à l'Anglais Ivry-sur-Seine (passerelle)	CD 48	Seine
95	Val-d'Oise Néant		
971	Guadeloupe Néant		
972	Martinique Néant		
973	Guyane Néant		
974	Réunion La Rivière de l'Est	RN 2	Rivière de l'Est

ANNEXE 4

NOTICES TECHNIQUES SUR LES MOYENS DE CONTRÔLE ET DE SURVEILLANCE DES CÂBLES

CONTRÔLE ÉLECTROMAGNÉTIQUE DES CÂBLES DE PONTS SUSPENDUS

Entreprise en 1964, l'étude de l'auscultation électromagnétique des câbles de ponts suspendus a débouché sur deux méthodes de contrôle différentes :

- la méthode des courants de Foucault qui permet de déterminer le degré d'oxydation du câble (oxydation généralisée) ;
- la méthode des tensions induites qui permet de détecter les fils rompus et les défauts internes.

Ces deux méthodes sont complémentaires.

Auscultation électromagnétique par la méthode des courants de Foucault

Principe de la méthode

Le principe de la méthode consiste à mesurer l'impédance d'une bobine dont le câble est le noyau, la self de la bobine augmentant avec le degré d'oxydation interne du câble. Les phénomènes qui provoquent cette variation sont les suivants :

a) Le champ magnétique alternatif créé par la bobine induit dans le câble des courants de Foucault qui sont de deux types :

- premier type : les courants de Foucault induits dans chaque fil élémentaire du câble. Ils limitent la magnétisation de chaque fil à une couronne superficielle d'épaisseur. C'est l'effet de peau des fils ;
- second type : les courants de Foucault prenant naissance dans tout le câble et se fermant à l'intérieur du câble, au hasard des variations de la résistance électrique de contact entre chaque fil et couche de fils. Ils produisent un "effet de peau" du câble qui empêche la magnétisation des couches de fils les plus internes.

b) Plus le taux d'oxydation d'un câble est élevé, plus la résistance électrique de contact entre les fils oxydés augmente : il en résulte une diminution des courants de Foucault du second type induits dans le câble, et, il y a de ce fait, davantage de fils magnétisés dans le câble.

Or, la valeur de la self de la bobine dépend essentiellement du volume d'acier à l'intérieur de celle-ci, c'est-à-dire en pratique du nombre de fils magnétisés. Elle augmente donc lorsque le nombre de fils magnétisés augmente. En conséquence, on peut dire que la self de la bobine augmentera jusqu'à ce que toutes les couches de fils du câble soient oxydées.

Matériel utilisé

La bobine d'auscultation électromagnétique est un solénoïde de 45 cm de long. Ce solénoïde comporte 96 spires et s'ouvre en deux demi-coquilles comportant des connecteurs sur toute la longueur. Cette disposition permet de mettre la bobine autour du câble.

Cette bobine est alimentée en courant d'intensité constante par un impédancemètre (fig. 1). Cet impédancemètre délivre à un enregistreur deux voies :

- une tension proportionnelle à la valeur de la résistance de la bobine ;
- une tension proportionnelle à la valeur de la self.

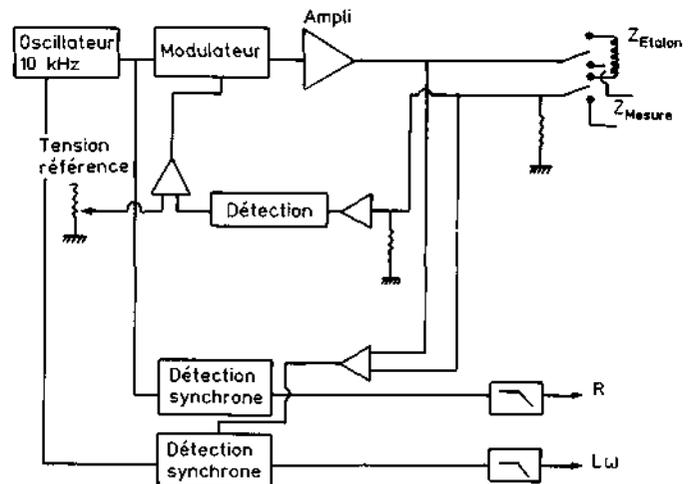


Fig. 1 - Impédancemètre.

On enregistre donc en continu les valeurs caractéristiques de l'oxydation. La vitesse de défilement du papier de l'enregistreur est synchronisée à la vitesse de déplacement de la bobine sur le câble, ce qui

permet de déterminer avec précision les zones oxydées.

Détermination de l'oxydation.

Le degré d'oxydation d'un câble ou d'un tronçon de câble est caractérisé par deux critères :

- le nombre de couches oxydées ;
- le taux d'oxydation, c'est-à-dire la proportion pondérale des oxydes par rapport au poids du tronçon.

L'étalonnage des variations de la self en fonction du degré d'oxydation des câbles monotorons d'un diamètre de 60 à 90 mm a été entrepris à partir de deux types de matériaux :

- câbles oxydés en service et déposés. Ces tronçons de câble ont été sélectionnés à partir de courbes de variation de la self entre les valeurs extrêmes observées (entre 300 et 460 μHz) ;
- tronçons que l'on fait oxyder dans une cuve à brouillard salin.

Le nombre de couches oxydées a été contrôlé par simple observation visuelle lors du détoronnage de chaque tronçon, couche par couche. Les fils de chaque couche ont été pesés avant et après élimination des produits de corrosion superficielle. Le rapport de la somme de ces pertes de poids des fils de chaque couche au poids total du tronçon avant élimination des produits de corrosion, exprimé en pourcent, constitue une estimation du taux d'oxydation d'un câble.

Les résultats portés sur un graphique (fig. 2) permettent par exemple de déterminer, point par point, la courbe d'étalonnage des variations de la self d'une bobine de 80 mm de diamètre pour un câble monotoron de 72 mm à 169 fils répartis en sept couches.

On peut aussi exprimer les variations du taux d'oxydation en fonction de la variation de la self en pourcent par rapport à la valeur de la self pour un câble sain (fig. 3).

Tous les essais ont été effectués à plusieurs fréquences. Pour les câbles classiques, la fréquence qui donne la plus grande sensibilité aux variations de la self est 10 kHz.

Les mêmes mesures d'étalonnage ont été effectuées pour des bobines de diamètres différents et il est possible actuellement de déterminer le taux d'oxydation et le nombre de couches oxydées pour un câble monotoron de composition donnée, sous

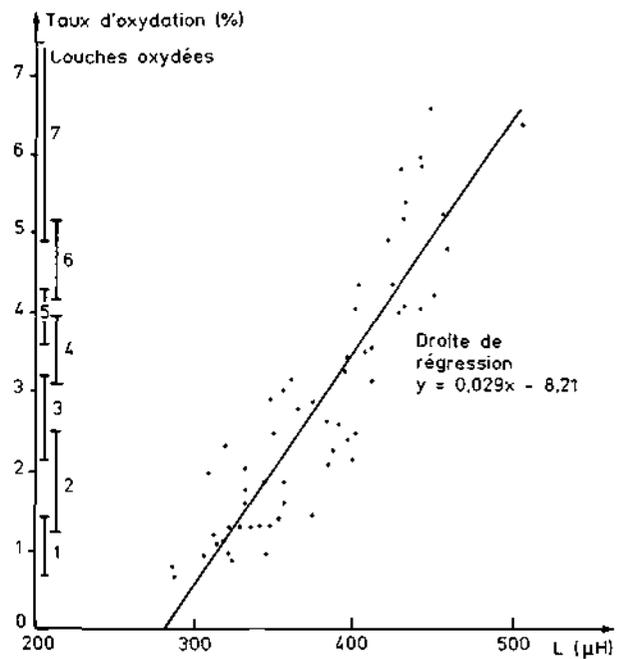


Fig. 2 - Courbe d'étalonnage des variations de self suivant l'oxydation sur câbles de 72 mm de diamètre.

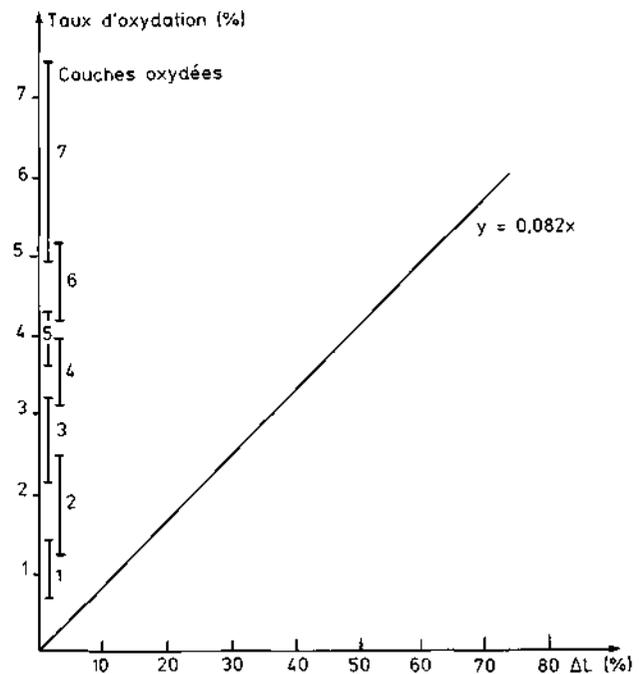


Fig. 3 - Variation du taux d'oxydation en fonction de la variation de self en pourcentage.

réserve de disposer de valeurs de référence pour un câble sain.

Conditions d'emploi

Cette méthode d'auscultation électromagnétique des câbles s'est avérée, à l'usage, très fidèle et très fiable. Pour obtenir un maximum de sensibilité, il faut que le diamètre des bobines soit proche du diamètre

du câble. A cet effet, nous disposons actuellement de bobines de 47, 60, 70, 80 et 100 mm de diamètre.

Dans le cas de câbles en nappe ou en couronne, il faut que ceux-ci soient distants de trois centimètres environ pour permettre le passage de la bobine.

Les mesures s'effectuent en continu, mais chaque passage des colliers d'attache des suspentes nécessite un démontage de la bobine.

Auscultation électromagnétique par la méthode des tensions induites

La mesure de la valeur absolue de la self de la bobine ne donne pas d'indications sur la présence de fils rompus, surtout lorsque ces ruptures sont situées dans une zone oxydée. On applique donc une deuxième méthode pour éliminer l'influence des zones d'oxydation.

Principe de la méthode

Un défaut géométrique (fil rompu ou autre) dans un câble soumis à un champ magnétique alternatif entraîne une distorsion des lignes de force du champ magnétique. Cette distorsion peut être assimilée à un flux de fuite et détectée au moyen d'une bobine entourant le câble. Pour une fréquence suffisante du champ magnétique alternatif, la tension induite dans cette bobine ne dépend pratiquement pas de la vitesse de défilement de la bobine sur le câble.

Dans le but de minimiser le plus possible l'influence de l'oxydation, on utilise deux bobines réceptrices en X sur le câble. Les plans de chacune d'elles se coupent sur l'axe du câble et sont inclinés à 45 °, de telle sorte qu'ils fassent entre eux un angle de 90 °. Le couplage magnétique des deux bobines est ainsi minimal ; elles se situent exactement sur la même zone du câble et ne sont pas sensibles à la corrosion du fait du montage en opposition, les tensions induites dans chaque bobine s'annulent.

Comme il existe deux positions privilégiées de détection d'un défaut suivant sa situation par rapport aux branches du X formé par les bobines réceptrices et que cela impliquerait d'effectuer au moins deux passages de la bobine d'auscultation sur un câble, un deuxième ensemble de bobines détectrices montées en opposition et décalé de 90 ° par rapport au premier ensemble complète le dispositif.

Matériel utilisé

De même que pour la bobine de détection de l'oxydation, les impératifs d'auscultation spéciaux aux câbles de ponts suspendus imposent un grand nombre de montages et de démontages (passage des suspentes), un encombrement minimal pour pouvoir contrôler deux câbles très rapprochés et un faible poids pour le montage en partie haute.

Les différents bobinages sont réalisés en deux moitiés, en fils souples.

La bobine magnétisante comporte deux bobinages de 54 spires montés en série de part et d'autre des bobines réceptrices.

Les bobines réceptrices, montées en opposition, comportent 10 spires chacune.

Tous les bobinages sont fixés sur deux demi-cylindres en celoron constituant le corps et portant des connecteurs sur toute la longueur. Un capot de protection en laiton assure la rigidité de l'ensemble, protège les bobinages et porte les dispositifs de centrage de la bobine sur le câble et le synchronisateur.

Un dispositif d'extraction est prévu pour éviter de détériorer les broches des connecteurs à l'ouverture de la bobine.

Détermination des fils rompus

La bobine magnétisante est alimentée avec une tension réglable de 100 Hz de fréquence.

L'appareillage permet d'avoir directement sur un enregistrement et pour chaque couple de bobines réceptrices :

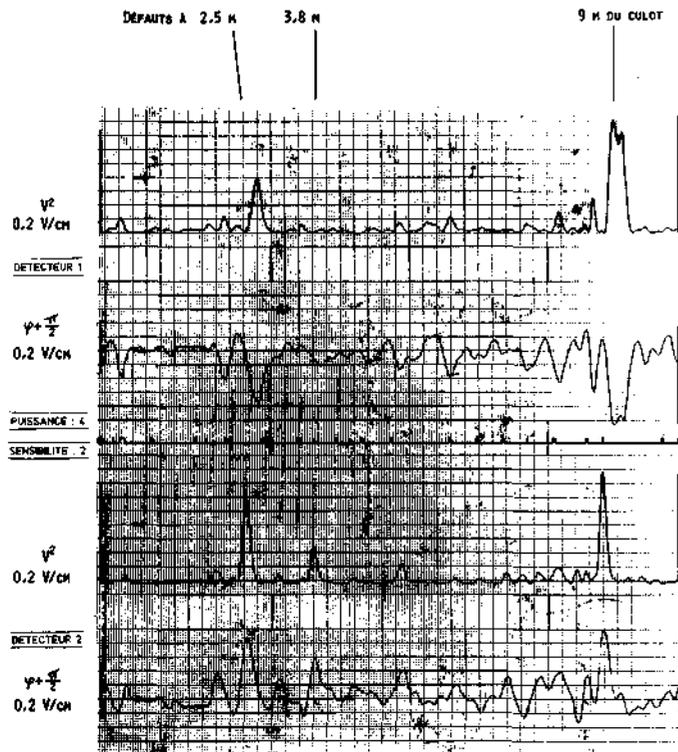
- le module de la tension détectée ;
- la valeur de la composante de la tension en quadrature avec la tension d'alimentation.

La détection d'une rupture de fil (ou de plusieurs fils) ou d'un défaut géométrique engendre sur les enregistrements des "pics" de tension plus ou moins importants en fonction de la nature du défaut (fig. 4).

Le déroulement du papier de l'enregistreur est synchronisé avec le défilement de la bobine sur le câble.

Conditions d'emploi

Les conditions d'emploi de cette méthode sont identiques à celles de la méthode par courants de Foucault.



CONSTATATIONS :

15 RUPTURES 2 ^e COUCHE	7 RUPTURES 2 ^e COUCHE	20 RUPTURES 2 ^e COUCHE
1 " 3 ^e "	12 " 5 ^e "	10 " 3 ^e "
		21 " 4 ^e "
		7 " 5 ^e "
		3 " 6 ^e "

Fig. 4 - Détection des ruptures de fils.

Il faut un diamètre de bobine voisin du diamètre du câble pour obtenir un maximum de sensibilité. A cet effet, nous disposons actuellement de bobines de 50, 60, 70, 80 et 100 mm de diamètre.

Il faut, dans le cas de câbles en nappe ou en couronne, que ceux-ci soient distants de quatre centimètres environ pour permettre le passage de la bobine.

Les mesures s'effectuent en continu, mais le passage des suspentes nécessite un démontage de la bobine.

SURVEILLANCE ACOUSTIQUE DES CÂBLES DE PONTS SUSPENDUS

Principe

La surveillance acoustique des câbles est une méthode de contrôle destinée à apporter au maître

d'oeuvre des renseignements sur la rapidité d'évolution des ruptures de fils élémentaires dans un câble d'un ouvrage.

Le principe de base est très simple : la rupture brutale d'un fil d'un câble engendre des "ondes de choc" qui se propagent dans le câble à une certaine vitesse.

En détectant ces ondes avec des capteurs appropriés, il est possible de mettre en place un dispositif de surveillance de l'ouvrage qui indiquera le nombre de ruptures de fils survenues dans un intervalle de temps donné.

Les études effectuées au Laboratoire central des Ponts et Chaussées sur les caractéristiques des ondes produites par la rupture d'un fil d'un câble, leurs conditions de propagation et les phénomènes parasites éventuels sur ouvrages, ont abouti à la réalisation d'une chaîne de surveillance acoustique qui permet d'enregistrer, en des points donnés, l'amplitude et le temps de passage des ondes produites par une rupture de fil dans un câble.

Description

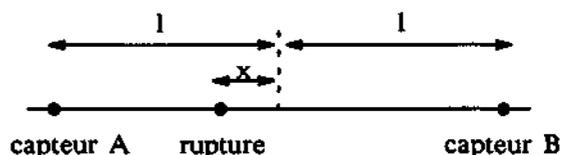
Données de base

Les capteurs sont constitués essentiellement par des accéléromètres qui délivrent un signal électrique au passage de chaque onde. Les signaux issus de chaque capteur sont amenés à une armoire centralisatrice de données qui assure l'enregistrement de l'amplitude de chaque signal et des temps de passage des ondes sous les différents capteurs, de manière à pouvoir calculer la vitesse de propagation et à localiser le point d'origine des ondes.

La mesure du temps de passage des ondes sous les capteurs est très importante car elle permet :

- de différencier les parasites électriques qui se propagent à la vitesse de la lumière, des phénomènes acoustiques se propageant à une vitesse beaucoup plus lente ;
- de localiser le point d'origine des ondes par un calcul simple lorsque la propagation a lieu dans une structure linéaire, ce qui est pratiquement le cas.

Le calcul est le suivant :



Soit une rupture se produisant à une distance x du point milieu de deux capteurs A et B distants de $2l$,

– l'onde arrive en A au temps : $T_A = \frac{1}{v}(l - x)$

– l'onde arrive en B au temps : $T_B = \frac{1}{v}(l + x)$

on a donc : $T_B - T_A = \frac{1}{v} \times 2x$

et $x = \frac{v}{2} (T_B - T_A)$.

Le système électronique le plus simple consiste alors à affecter un compteur de temps à chaque capteur. Dès qu'un capteur reçoit une onde, tous les compteurs démarrent et ils sont arrêtés par le passage de l'onde sous leurs capteurs respectifs. On obtient ainsi directement les différences de temps $T_B - T_A$.

mis par les capteurs. On obtient :

– l'amplitude de la première demi-alternance ;

– l'amplitude des autres alternances ;

– le temps de passage des ondes sous les capteurs : au premier capteur ayant reçu l'onde est affecté le temps zéro qui sert d'origine pour la mesure du temps écoulé jusqu'aux passages successifs sous les autres capteurs ;

– la date de l'événement enregistré en jours, heures, minutes et secondes.

De plus, un dispositif électronique particulier permet de supprimer l'impression des phénomènes parasites détectés par moins de trois capteurs. En pratique, ce système élimine tout phénomène n'ayant pas donné lieu à une propagation d'ondes dans l'ouvrage surveillé.

Utilisation sur ouvrage

Capacité de surveillance

La partie d'un ouvrage qu'il est possible de surveiller avec un ensemble de cinquante capteurs dépend essentiellement des conditions de propagation des ondes propres à chaque ouvrage.

Pour assurer la mesure de la vitesse de propagation, il est nécessaire que chaque onde soit détectée au moins par trois capteurs. A partir de cet impératif, les distances entre deux capteurs doivent être les suivantes :

– 15 à 20 m pour un câble élémentaire monotonon, soit une capacité totale de surveillance de 750 à 1000 mètres ;

– 5 à 10 m pour un câble constitué d'un faisceau de plusieurs câbles élémentaires parallèles, soit une capacité totale de surveillance de 250 à 500 mètres.

Une armoire peut gérer un maximum de 100 capteurs et les capacités indiquées peuvent être doublées en s'équipant de capteurs supplémentaires.

On voit que la méthode de surveillance acoustique est surtout intéressante lorsque l'on craint les ruptures de fils sur une partie bien déterminée d'un ouvrage important. Elle peut alors apporter des renseignements précieux sur l'évolution des ruptures dans une section jugée dangereuse.

Phénomènes parasites

Le terme "parasite" est pris ici au sens large, il s'agit de tout signal détecté ne correspondant pas à une onde acoustique.

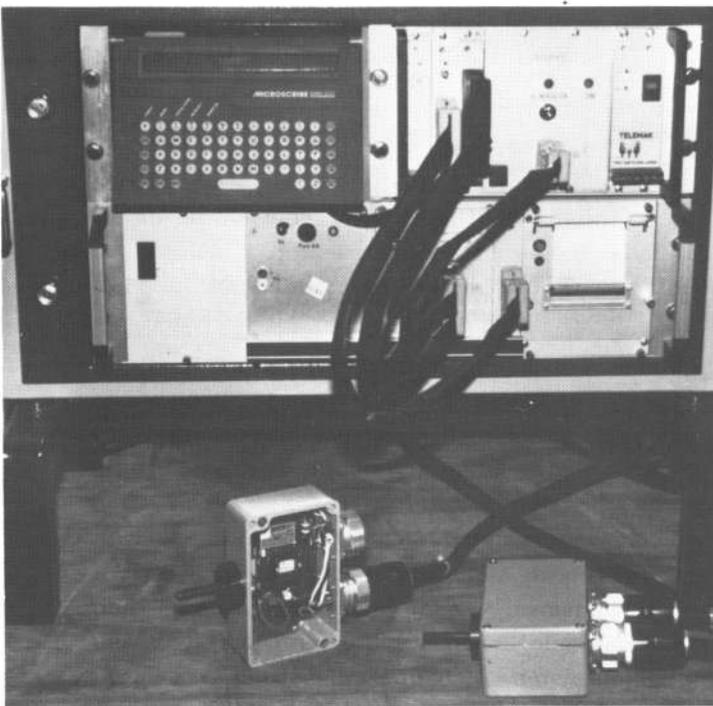


Fig. 5 – Appareillage de surveillance acoustique.

Description de l'appareillage

L'appareillage comporte cinquante capteurs reliés à une armoire centralisatrice de données (fig. 5).

Chaque capteur consiste en un boîtier étanche comprenant un accéléromètre et une électronique associée assurant le traitement et la transmission des signaux à l'armoire centralisatrice.

L'armoire centralisatrice contient tous les circuits nécessaires au traitement et à l'enregistrement sur imprimante et mémoire de masse des signaux trans-

Le problème des parasites électriques a été résolu par une solution technologique, mais d'autres "parasites" peuvent se produire. Il s'agit :

- des vibrations et des oscillations propres d'un ouvrage sous l'effet de la circulation ou du vent. Toutefois, les ondes produites ont des fréquences très basses par rapport aux fréquences d'une onde de rupture de fil et les capteurs utilisés ne sont pas sensibles à ces fréquences. Les risques d'enregistrement de ce type de parasite sont donc très faibles ;
- des ondes engendrées dans l'ouvrage par tout phénomène de choc mécanique. Par exemple, un joint de chaussée défectueux peut occasionner des chocs au passage des véhicules. Si des capteurs sont placés à proximité, les ondes créées seront détectées et enregistrées. Ces "parasites" répétitifs et toujours localisés risquent d'entraîner un épuisement prématuré du rouleau de papier enregistreur et d'imposer des visites très fréquentes de l'appareillage de surveillance. C'est pourquoi, il a été prévu un relèvement automatique du seuil de chaque capteur si la fréquence de ces "parasites" dépasse une certaine valeur.

Avant de décider une implantation de longue durée du système de surveillance acoustique sur un ouvrage, une étude préliminaire s'impose, certaines parties de l'ouvrage pouvant se révéler très difficiles à surveiller efficacement.

Installation

L'installation de la surveillance acoustique nécessite de disposer d'une source de courant sur l'ouvrage. Les capteurs sont répartis le long des câbles sur une ou plusieurs lignes suivant le nombre de câbles (25 lignes maximum). Les données concernant l'implantation du système de surveillance propres à chaque ouvrage (nombre de lignes utilisées, nombre de capteurs sur chaque ligne, seuils, distance entre les capteurs) sont programmées lors de l'installation pour permettre au calculateur de déterminer en temps réel la localisation des ruptures de fils.

Exploitation des résultats

Les résultats sont enregistrés dans une mémoire de

masse amovible (256 ko) et les événements les plus importants sont imprimés au fur et à mesure sur papier pour exploitation immédiate.

Exemple d'un événement :

22 août 88 9 heures 34 37			
1/	0.5 g	/	1.0 g / 1631 µs
2/	0.5 g	/	1.5 g / 712 µs
3/	2.0 g	/	13.0 g / 0 µs
4/	4.0 g	/	11.0 g / 87 µs
Lig 1	Pos 3	capt. 4	
Local : 1.36 m		vitesse : 4438 m/s	

L'origine de l'onde acoustique de cet événement est proche de la position 3 (temps : 0 µs). Sa localisation précise est donnée par rapport à cette position (ici 1,36 m après la position 3) par la formule :

$$\text{Local} = 1/2 [\text{distance}(3, 4) - \text{vitesse} \times \text{temps } 4]$$

$$= 1/2 (3, 12 - 4438 \times 87 \cdot 10^{-6}) = 1, 36$$

La vitesse de l'onde est mesurée sur la distance 2,3 par :

$$\text{vitesse} = \frac{\text{distance}(2, 3)}{\text{temps } 2} = \frac{3, 16}{712 \cdot 10^{-6}}$$

La précision de la localisation est estimée en observant l'amplitude de la première demi-alternance : une amplitude très supérieure au seuil garantit une bonne localisation.

Les amplitudes des autres alternances (13g /11 g /1,5g /1 g) renseignent sur la puissance de l'émission.

La précision est de l'ordre de ± 15 cm (dans la mesure où les premières demi-alternances ont été dix fois supérieures au seuil).

Les résultats contenus dans la mémoire de masse amovible sont exploités en différé sur l'ordinateur. On peut alors vérifier l'exploitation automatique faite sur site, étudier le fonctionnement général de l'appareillage et obtenir la synthèse des résultats portant sur de longues périodes de surveillance.



NOTICE SUR LES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE L'AGRESSIVITÉ DE L'ENVIRONNEMENT DANS UN SITE DONNÉ

Il est possible de caractériser les phénomènes de corrosion dus à l'atmosphère du site d'un pont suspendu, qualitativement, en étudiant la nature des agents corrosifs actifs, et quantitativement, en mesurant la masse de métal dissous par unités de temps et de surface, les effets d'érosion dus aux vents et aux poussières étant supposés négligeables sur les sites d'implantation actuels des ouvrages en France.

Les phénomènes de corrosion étant des phénomènes électrochimiques qui se produisent en présence d'eau, une mesure de l'agressivité d'un site consiste à analyser la teneur en ions des eaux de ruissellement sur un câble. On relève alors la teneur en anions réputés agressifs (chlorure, sulfure, sulfate, nitrate, carbonate, etc.) et également la teneur en métaux dissous (ion ferreux, ion ferrique, et, si les câbles sont galvanisés, ion zinc). Ces mesures sont alors rapportées à la longueur, ou surface, unitaire du câble d'où proviennent les eaux de ruissellement. Sur le plan pratique, les eaux sont recueillies dans les parties basses des câbles ou dans les chambres d'ancrage à l'aide de bidons en matière plastique munis d'un "collecteur"; toutes les eaux étant récoltées, il est nécessaire d'effectuer un relevé périodique afin d'éviter la perte d'une partie de ces eaux et de prévenir le développement de matières organiques.

Indépendamment des études sur les ouvrages en place, les étu-

des d'agressivité d'un site vis-à-vis d'un métal (acier, acier galvanisé, acier inoxydable, alliage d'aluminium, etc.) doivent être conduites en respectant les recommandations du groupe de travail "Corrosion en atmosphères naturelles et synthétiques" de la Commission d'étude "Protection par revêtements" n° 4 du Cefracor (Centre français de la corrosion). Il ressort de ces travaux que des essais accélérés permettent un classement des matériaux ou des revêtements de protection, mais que l'on ne peut extrapoler leurs résultats pour estimer le comportement réel en milieu naturel. Par contre, les sites étudiés peuvent servir de base pour l'estimation de l'agressivité d'un site particulier, par comparaison de caractéristiques telles que la température, l'humidité relative, les précipitations, les chlorures, l'acidité totale, etc., et de leur évolution au cours des cycles annuels.

Le Ministère chargé de l'Environnement publie également des données sur la pollution de l'air dans divers sites, que l'on peut comparer à celles de l'étude du Cefracor en vue de connaître le site dont l'agressivité est la plus proche de celle du site à étudier.

L'attention doit en outre être portée sur les conditions agressives locales telles que la présence d'usines, de centrales électriques, et autres, à proximité de l'ouvrage en place ou à construire.

SYSTÈMES DE PROTECTION ANTICORROSION SÉLECTIONNÉS APRÈS ESSAIS EN LABORATOIRE

	Sans sous-couche	Avec sous-couche zinc époxy ou zinc silicate	Avec primaire d'accrochage
CÂBLES EN FILS CLAIRS Brossés : application sur un ancien brai	- brai époxy polyuréthane 1 ① - brai vinylique 3 ②		
CÂBLES EN FILS CLAIRS Décapés par projection d'abrasif	- brai époxy 1 ①	- brai époxy 7 ⑤ - brai époxy polyuréthane 1 ① - polyuréthane 5 ⑤ - brai vinylique 2 ② - époxy amide 3 ③	
CÂBLES EN FILS GALVANISÉS		- brai époxy 3 ① - polyuréthane 2 ①	- brai époxy sur époxy chromate de zinc (ou strontium) 5 ⑤ - époxy ou polyuréthane sur époxy amide chromaté de zinc 3 ③
Après chaque type de système le premier chiffre indique le nombre de systèmes essayés, le deuxième chiffre cerclé le nombre de systèmes sélectionnés.			

Ce document est propriété de l'Administration, il ne pourra être utilisé ou reproduit, même partiellement sans l'autorisation du LCPC ou du SETRA.

© 1989 LCPC - Dépôt légal : Décembre 1989 - ISBN 2-7208-6190-1

RÉSUMÉ

" Les Ponts suspendus en France " est un ouvrage didactique destiné à faciliter aux gestionnaires la surveillance et l'entretien des ponts suspendus existants.

Il comprend trois parties :

- généralités et description critique,
- surveillance : méthodologie et moyens,
- annexes techniques.

La première partie traite des principes de calcul et des diverses dispositions constructives rencontrées. Elle précise les avantages et les inconvénients de ces dernières.

La deuxième partie traite de la méthodologie de surveillance et des moyens disponibles. Elle constitue un guide de visite et de diagnostic.

Les annexes techniques comprennent la liste des textes réglementaires et des notices ou spécifications techniques particulières.

ABSTRACT

" Suspension Bridges in France " is a didactic work intended to make it easier for managers to survey and maintain existing suspension bridges.

It consists in three parts :

- generals and critical description,
- survey : methodology and means,
- technical appendices.

The first part deals with the principles of calculation and various design details. It describes relevant advantages and disadvantages.

The second part deals with the methodology of survey and with the means available. It constitutes a guide for inspection and diagnosis.

The technical appendices include the list of regulations and some particular technical directions or specifications.

Ce document est disponible :

- au Bureau de vente
SETRA, 46, avenue Aristide-Briand, BP 100, 92223 Bagneux - France
Tél. : (1) 42 31 31 53 et (1) 42 31 31 55
- au Service IST-Publications
LCPC, 58, boulevard Lefebvre - 75732 Paris Cedex 15
Tél. : (1) 40 43 52 26

Réf. : F 8876

Prix : 160 F TTC

