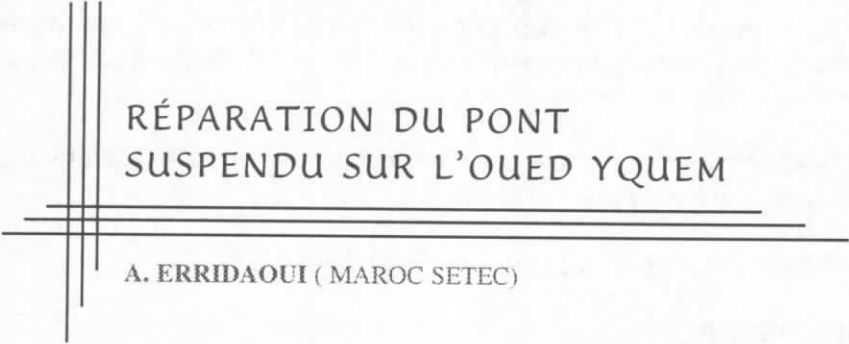




RÉPARATION DU PONT SUSPENDU SUR L'OUED YQUEM

A. ERRIDAOUI (MAROC SETEC)

INTRODUCTION

Le Maroc possède, à l'heure actuelle, un patrimoine de quelques trois ponts suspendus importants. Les plus anciens, ont été construits par l'entreprise Arnodin entre 1917 et 1923.

Il s'agit des ponts de franchissement des oueds Yquem et Cherrat par la RP 1. Plus récemment, un autre pont suspendu a été construit en 1953 sur l'oued El Abid à Ouauizert.

Ce type d'ouvrage, en raison de sa structure particulière, nécessite un entretien et des interventions de façon régulière. Si celles-ci peuvent se limiter à une simple réfection de la peinture anticorrosion, elles consistent parfois en des opérations lourdes de changement de la suspension.

Tel est le cas des ponts suspendus sur la RP 1. En effet, compte tenu de leurs âges avancés d'une part et de leur exposition aux agents agressifs constitués par l'atmosphère marine et le trafic lourd d'autre part, ces ponts ont subi quelques désordres.

Dans le cadre de cet article et par souci de concision, on se limitera au seul cas du pont suspendu sur l'oued Yquem.

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

1 - HISTORIQUE

Le ponts de franchissement de l'Oued Yquem a été construit en 1917 par l'Entreprise ARNODIN. Il s'agit d'un ouvrage suspendu entièrement métallique.

Il a été rénové en 1958, puis dans les années 1976-1977, où plusieurs modifications ont été effectuées.

Il s'agit, d'après l'examen des plans d'exécution de l'époque, de la rénovation des éléments suivants :

- changement d'une partie de la suspension (câbles paraboliques), de la totalité des câbles de retenue et de certains haubans;
- réfection de la membrure supérieure de la poutre de rigidité et adjonction de contrefiche;

- remplacement de certains montants de la poutre de rigidité;
- remplacement de certaines pièces de pont;
- remplacement de la dalle de béton armé par un platelage constitué de bacs en acier boutonné (allègement de charges);
- remplacement de diverses petites pièces : étriers, boulons, diagonales de poutres de rigidité, plaques de glissement des membrures.

2 - DESCRIPTION GÉNÉRALE

L'ouvrage porte une chaussée de 6.00 m et deux trottoirs de 0.60 m chacun. Il est constitué d'une travée indépendante de 103.50 m entre axe des piles et de 100 m de portée et de deux travées d'accès, en remblai, de 40 m chacune.

La travée médiane est réalisée en charpente métallique. Les piliers et les culées d'ancrage sont réalisés en maçonnerie.

Cette travée médiane est suspendue par l'intermédiaire de suspentes à 2 x 8 câbles de suspension principaux ancrés dans les culées d'extrémités et 4 x 8 haubans situés à proximité des piles.

3 - RAPPEL DE LA CONCEPTION DE L'OUVRAGE D'ART

Le principe de fonctionnement d'un pont suspendu peut être schématisé de la façon suivante:

- Le tablier, constitué de pièces de ponts régulièrement espacées tous les 1.25 m et de deux poutres de rigidité en treillis en X assure la répartition des charges routières. Ce tablier comprend en outre :
 - Un platelage métallique, constitué de bacs en acier, disposés longitudinalement assurant la transmission des charges routières aux pièces de pont. Ce platelage métallique a été substitué au hourdis de béton armé initial.
 - Des longrines en profilés métalliques, destinées à assurer la répartition des charges entre les pièces de pont, et fixées sur ces dernières au moyen d'étriers en rond d'acier. Ces longrines sont disposées en rive et au milieu de l'ouvrage.
 - Deux trottoirs en tôles larmées, fixés au moyen de cornières sur la poutre de rigidité et les pièces de pont.
 - Des suspentes, réalisées en fer forgé, remontent les charges du tablier vers les câbles de suspension.

- La suspension, constituée de 2 x 8 câbles toronnés de type 127 F 4.7 mm et de tracé parabolique, assure la fonction porteuse. Ces câbles transmettent la charge verticale aux pylônes en maçonnerie et la charge horizontale aux culées d'ancrage.
- Les suspentes verticales sont complétées par des haubans inclinés, au nombre de 2 x 6 par côté. Ces haubans sont destinés à réduire les déformations du tablier. Ils sont constitués de câbles toronnés de type 91 F 4.7 (haubans 1 à 4) et 127 F 4.7 (haubans 5 et 6).
- Deux piliers en maçonnerie, disposés de part et d'autre de la brèche, à une distance de 103.50 m transmettent les charges verticales au sol de fondation.
- Les câbles de suspension prennent appui sur la maçonnerie par l'intermédiaire de selles à galets, permettant les déplacements horizontaux de la réaction verticale en tête du pylône en réduisant au maximum les frottements.
- Deux culées d'ancrage assurent la reprise des réactions obliques des câbles de retenue des haubans et de la suspension.

4 - DESCRIPTION DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU TABLIER

a - La suspension

Elle est constituée de 2 nappes de 8 câbles 127 F 4.7 mm toronnés non clos en acier à haute résistance. La protection contre la corrosion est réalisée par un brai. Ces câbles sont disposés en une seule nappe horizontale de 8 câbles par côté. Ces câbles continus sont ancrés dans une chambre située à 40 m environ du pilier en maçonnerie.

b - Les suspentes

Les suspentes sont réalisées en fer forgé, en une seule pièce comportant deux boucles eu Y à l'extrémité supérieure et une boucle à l'extrémité inférieure.

Leur diamètre est de 34 mm.

L'attache des suspentes est réalisée par 8 étriers bouclés autour des câbles et fixée à une traverse en I 120 x 58, comprenant 2 selles moulées pour l'assise des boucles.

Des colliers enserrrent les câbles et empêchent ainsi le glissement des étriers sur la suspension.

c - Les haubans

Les six haubans sont fixés, au moyen d'étriers en rond F 48 mm d'une part sur la selle à galet située en tête des pylônes en maçonnerie, et d'autre part sur les longrines de rive.

Le système d'attache est classique. Il comprend :

- un culot en acier moulé, dans lequel le câble est arrêté par une coulée de zinc;
- un étrier de réglage enserrant les longrines de rive et bloqué sur un taquet d'arrêt moulé, fixé sur le profilé.

Ils sont constitués respectivement :

- haubans 1, 2, 3 et 4 (près du pilier) : 91 F 4.7 mm
- haubans 5 et 6 : 127 F 4.7 mm

Tous ces haubans sont ancrés, en pied, tous les 3.75 m et en tête sur la selle d'appui.

Au-delà du pilier, 2 câbles de retenu de type 127 F 4.7 mm fixés en tête sur la selle d'appui et ancrés dans la chambre de retenue assurent la continuité des efforts apportés par le haubanage.

Les ancrages sont de type en ceinture, les étriers d'extrémité des câbles enserrant un axe vertical, les poussées au vide des câbles courbes étant reportées par l'intermédiaire de selles en acier moulé à la maçonnerie.

d - Les pièces de pont

Elles sont constituées par des poutres sous-tendues, espacées tous les 1.25 m constituées par un assemblage de 2 U 140 x 52 x 9.

Deux bracons, de forme triangulaire, disposés grossièrement au 1/3 et au 2/3 de la poutre permettant la fixation d'un câble 61 F 4 mm sous-tendeur.

Un grand nombre de pièces de pont ont été refaites en 1976-1977. Le sous-tendeur est alors constitué par un rond F 45. La poutraison, sans doute altérée par la corrosion, a été remplacée par :

- 2 U 140
- 2 bracons en Té 100 x 80

L'attache d'origine, constituée par un axe sur palier et 2 étriers en U permettant la tenue et le réglage du bloc d'ancrage, a été remplacée lors de la rénovation par une simple attache par filetage du sous-tendeur et platine biaise d'appui. Un laçage en croix de Saint-André, situé dans le plan de la membrure supérieure de pièces de pont, constitue, avec les membrures inférieures des poutres de rigidité, la poutre au vent assurant la stabilité horizontale du tablier.

e - Les longrines

Les longrines sont destinées à assurer la répartition des charges entre les pièces de pont. Situées en rive et dans l'axe du pont, elles sont constituées de profilés du commerce fixés aux pièces de pont par des étriers. Les longrines de rive reçoivent également l'attache inférieure des haubans sur des cales moulées, fixées sur leur membrure inférieure.

L'efficacité de ces longrines dépend en grande partie de la rigidité de leur fixation aux pièces de pont.

Cette fixation est réalisée au moyen d'étriers en rond d'acier.

Elles sont constituées par des IPN 300 x 125 x 108, ou IPE 300 x 150 lors de la rénovation.

f - Les poutres de rigidité

Ce sont des poutres treillis en X, simplement posées et fixées aux pièces de pont, dont la membrure supérieure est maintenue transversalement par des contrefiches triangulaires espacées tous les 6.25 m environ.

Elles sont constituées par un assemblage de petits profilés du commerce par rivetage (sans doute utilisé pour les pièces d'origine) et boulonnage (pour les pièces remplacées ou renforcées).

La membrure supérieure est constituée par :

1 U 100 x 51
2 L 70 x 70 x 7
2 U 100 x 51

La membrure inférieure est constituée par : 2 U 200 x 75

Les montants sont constitués par 2 U 100 x 51 liaisonnés par des entretoises tubulaires et boulons.

Les diagonales sont constituées par 2 boucles F 24 mm, réglées par platines moulées et écrous au niveau de la membrure supérieure.

Les noeuds de la poutre treillis sont constitués par des axes F 60 mm, simplement maintenus dans les gorges des montants par la tension des diagonales en X.

Ces dispositions constructives font que la poutre présente certainement une rigidité plus faible que ne le laisse penser le calcul des inerties du fait des jeux importants engendrés :

- par l'usure des axes et des paliers
- par le desserrage des diagonales
- par les défauts de rectitude de la membrure supérieure, de faible inertie transversale et déformée par des chocs de véhicules, ou par une amorce de déversement latéral. La souplesse de l'ensemble contrefiche/pièce de pont, la dégradation localisée des contrefiches et le dérèglement de la suspension sont sans doute à l'origine de cette déformation.

g - Le platelage

Constitué par une succession de caissons "Arnodin" en acier, boulonnés entre eux et à la structure, le platelage est en bon état. Chaque caisson repose sur trois pièces de pont. Compte tenu de leur rigidité de forme, ces caissons jouent certainement un rôle non négligeable dans la répartition des charges au centre. Un profilé HEA 160 permet le rattrapage de hauteur entre les pièces de pont et le platelage. Ce profilé a été ajouté lors de la suppression du hourdis de béton armé.

h - Les selles d'appui

Constituées de pièces moulées, profilés et axes de fixation, elles sont situées en tête de pylônes en maçonnerie. Elles assurent en théorie le glissement de la charge verticale en minimisant les réactions horizontales. Un bracon relie les deux pièces en vis-à-vis. Il est destiné à reprendre la poussée au vide, orientée vers l'extérieur, due au tracé en plan de la suspension.

i - Appui du tablier sur les piles

Ils sont constitués au droit des membrures de la poutre treillis et des longérons par des boîtes formant coulisseau et permettant le libre déplacement longitudinal du tablier sous l'effet des charges verticales mobiles et la libre déformation sous l'effet des dilatations thermiques.

1 - PRINCIPE D'ÉTUDES DE L'OUVRAGE

Afin d'étudier correctement le fonctionnement de l'ouvrage, de par sa structure et son comportement vis-à-vis des charges qu'il supporte, il est nécessaire de :

1. rendre compte du fonctionnement funiculaire des structures en utilisant la théorie des grands déplacements.
2. modéliser complètement tous les éléments constitutifs des poutres de rigidité avec leurs membrures, leurs diagonales et leurs montants pour prendre en considération les conséquences de leurs destructions partielles.
3. établir un modèle entièrement spatial afin de pouvoir étudier le comportement non symétrique de l'ouvrage aussi bien vis-à-vis des charges appliquées que de l'état du pont dont les désordres sont plus importants du côté aval que du côté amont sans doute à cause de l'exposition aux vents venant de la mer.

L'étude consiste donc à établir un modèle entièrement spatial dans lequel tous les éléments de charpente du tablier sont représentés, puis à effectuer les calculs en grands déplacements du modèle.

Les calculs comportent plusieurs phases :

- La première phase est l'établissement de l'état du pont à vide chargé par son poids propre.
- Les phases suivantes consistent à décrire plusieurs réglementaires ou expérimentaux.

Ces calculs ont d'abord été exécutés sur le modèle idéal du pont qui ne présente aucune dégradation, c'est-à-dire dans l'état réparé. Ils ont été ensuite exécutés sur le modèle dégradé, l'état des dégradations étant évalué à partir des résultats de mesure disponibles.

Les résultats obtenus sont comparés aux limites admissibles données par les règlements ou la littérature spécialisée pour chaque type d'éléments du pont, dans les deux cas étudiés : l'état idéal ou état réparé, puis l'état dégradé.

2 - LA THEORIE DES GRANDS DEPLACEMENTS

Sous les effets des charges de poids propre, de service, de température, les comportements mécaniques des éléments qui constituent un pont suspendu ont les caractéristiques suivantes :

- Les câbles porteurs ont une rigidité de flexion propre très faible. Ils doivent leur rigidité et leur stabilité d'ensemble au fait qu'ils sont tendus. Leur comportement est élastique parce qu'ils s'allongent lorsqu'ils sont tendus, mais surtout funiculaire pour que leur forme s'adapte au tracé funiculaire des actions qu'ils supportent;
- Les suspentes ont une rigidité de flexion propre très faible. Leur comportement est élastique;
- Les éléments qui constituent le tablier présentent des rigidités de flexion propre et ont un comportement élastique classique.

La méthode de calcul dite des "grands déplacements" rend compte des comportements individuels précédemment énumérés ainsi que de leurs interactions.

Les schémas de la figure ci-dessous illustrent de façon simpliste les différences entre les trois méthodes de calcul suivantes :

- La résistance des matériaux classique qui suppose la nullité des déplacements;
- Le deuxième ordre qui suppose que les déplacements restent faibles;
- Les grands déplacements qui prennent en compte les déplacements réels. Une dénomination plus exacte serait d'ailleurs "théorie des déplacements réels".

La partie haute de la figure concerne un élément rigide en flexion $EI \neq 0$ encasté d'un côté, chargé de l'autre. Dans les colonnes successives 1, 2, 3, les états d'équilibre sont obtenus respectivement sans déplacement, avec le déplacement horizontal u , avec les déplacements réels u et v .

La partie basse de la figure concerne un élément souple en flexion $EI = 0$ (par exemple une corde) fixe d'un côté chargé de l'autre. Dans la colonne 1, l'équilibre est impossible. Dans la colonne 2, il est possible, mais la déformée obtenue AB est erronée. Dans la colonne 3, il est possible et la déformée obtenue est exacte, c'est-à-dire que la longueur AB est égale à la longueur AB majorée par le seul allongement élastique dû aux forces appliquées.

Dans un modèle qui représente un pont suspendu, le câble est constitué par plusieurs éléments du type AB. Dans ce cas, l'utilisation du deuxième ordre entraînerait un allongement parasite global du câble qui fausserait les moments de flexion sollicitant le tablier.

Ce simple exemple montre bien que les calculs en grands déplacements ou plus exactement en déplacements réels sont indispensables à l'étude des structures composées de câbles.

La procédure générale du calcul en déplacements réels est la suivante :

- Les déplacements D sont calculés à partir des forces appliquées F par la résolution $D = R^{-1} F$ où R est la matrice de rigidité de la structure.

La matrice de rigidité propre à un élément est la somme de deux matrices : la première est la matrice de rigidité classique de la RDM, la deuxième dont les termes sont proportionnels à l'effort normal appliqué à l'élément est la matrice de rigidité géométrique.

C'est elle qui stabilise les câbles porteurs et qui assouplit les éléments rigides comprimés rendant ainsi compte de façon implicite des effets dits du deuxième ordre.

- Les longueurs réelles des éléments sont conservées en utilisant la correction dite de corps rigide.

- L'état d'équilibre est obtenu en opérant des itérations sur les états déformés successifs chargés par les résidus d'équilibre constatés sur les actions et les sollicitations relatives à chaque noeud du système.

- Le constat d'un résidu d'équilibre nul d'une part, et de la cohérence entre les efforts normaux obtenus et ceux calculés de façon géométrique constitue une vérification quasi absolue de la validité des résultats.

Le logiciel PYTHAGORE, conçu par la SETEC, met en oeuvre tout les principes précédents de façon numérique.

C'est ce logiciel qui est utilisé pour rendre compte du comportement du pont suspendu sur l'Oued Yquem. Le modèle adopté comporte 1223 noeuds et 2627 éléments.

3 - PROCÉDURE DE DÉTERMINATION DE L'ÉTAT A VIDE

Les caractéristiques de l'état à vide idéal sont les suivantes :

1. Les charges appliquées à la structure sont les poids propres de tous les éléments.

2. Les suspentes sont verticales (bien qu'en réalité elles ne le sont pas exactement).

3. Les suspentes et les haubans équilibrent de façon régulière les poids des éléments en sorte que les déplacements du tablier soient quasiment nuls.

4. La flèche du câble porteur est 12.45 m.

5. Les dispositifs d'accrochages supérieurs des câbles et des haubans sont des appuis glissants dans le sens longitudinal, ou encore, les composantes des forces horizontales développées par les câbles de retenue, d'une part, sont égales à celles développées par les haubans et les câbles porteurs, d'autre part.

Les étapes de la détermination par le calcul de l'état à vide sont :

1. Tous les éléments sont activés sauf les câbles de retenue. Les noeuds en tête de pylônes sont fixes dans toutes les directions.

Les points d'accrochages inférieurs des haubans et des suspentes sont fictivement bloqués dans la direction verticale (ce sont des appuis simples fictifs).

Le lancement du calcul produit des résultats où les réactions des appuis fictifs précédents sont très faibles, puisque les tensions des suspentes et des haubans équilibrent globalement et de façon répartie le poids du tablier.

2. Les appuis fictifs de l'état précédent sont supprimés.

On constate alors que les déplacements des noeuds correspondants sont minimes : de 0 à 2 mm.

3. Dans les calculs précédents, la forme de départ utilisée pour le câble porteur était une parabole sur laquelle les points d'accrochage des suspentes étaient disposés régulièrement au droit des points d'accrochage sur le tablier. La mise en forme funiculaire du câble porteur déplace ses noeuds dans le sens horizontal et dans le sens vertical.

Il en résulte que les suspentes ne sont plus verticales et que la flèche du câble porteur n'est pas rigoureusement égale à 12.45 m.

Les données de départ portant sur les abscisses des noeuds du câble porteur et sur la flèche de ce câble sont corrigées de façon manuelle en opérant d'une part des corrections d'abscisses, d'autre part une correction de flèche. Un nouveau calcul analogue à ceux définis en 1 et 2 est effectué. On constate alors sur les résultats de l'état final, que les suspentes sont verticales et que la flèche du câble porteur est égale à 12.45 m.

4. Les câbles de retenue sont activés. Leurs extrémités supérieures sont fixes dans toutes les directions, et leurs extrémités inférieures sont aussi fixes dans toutes les directions. Ces éléments sont soumis à un raccourcissement relatif.

Le calcul donne comme résultat principal les réactions d'appui horizontales, égales entre elles en valeurs absolues, par symétrie, développées aux noeuds supérieurs.

La valeur des réactions horizontales est fonction du raccourcissement relatif e.

e. En effectuant plusieurs calculs avec plusieurs valeurs de e , on détermine la valeur e qui correspond à la réaction horizontale nulle.

5. Les noeuds en tête de pile sont libérés dans la direction horizontale X parallèle à l'axe du pont. On constate alors que ces noeuds ne sont pas déplacés dans le sens horizontal et que les composantes horizontales des câbles de retenue équilibrent exactement celles du câble porteur et des haubans. L'état à vide est alors parfaitement simulé pour recevoir ensuite des cas de charge divers.

4 - SURCHARGES

Nous avons d'abord étudié les 4 cas de charge strictement réglementaires suivants :

- La charge A(l) appliquée sur tout le tablier.
- La charge A(l) appliquée sur la moitié du tablier.
- La charge Bc constituée par deux files de deux camions de 30 t.

Les deux files sont excentrées au maximum par rapport à l'axe de la chaussée, et les charges sont réparties sur les pièces de pont conformément à la géométrie des camions donnée par le règlement.

- Le centre de gravité des charges est au milieu du tablier dans le sens longitudinal.

- Le cas précédent avec le centre de gravité des charges au quart du tablier dans le sens longitudinal.

Nous avons ensuite étudié des charges du type Bc minorées, constituées par des camions de 12 t munis de deux essieux de poids respectifs 4 t et 8 t.

Les trois cas de charge correspondants sont :

- La charge Bc minorée est constituée par deux files de deux camions de 12 t.

Ces deux files sont excentrées au maximum par rapport à l'axe de la chaussée.

- La distance entre les essieux du même camion est 4.50 m.

- La distance entre les essieux de deux camions d'une file est 3.50 mètres.

Pour le reste, les données sont les mêmes que celles du convoi Bc classique.

- Le centre de gravité des charges est au milieu du tablier dans le sens longitudinal.

- Le cas précédent avec le centre de gravité des charges au quart du tablier dans le sens longitudinal.

- Le cas précédent auquel est ajouté une force de freinage horizontale de 12 t pour un des camions.

Enfin, nous avons considéré un cas de charge thermique qui consiste à abaisser la température de 30 degrés pour tous les éléments du pont.

5 - LE PONT ET LES ESSAIS D'EPREUVE

a - Les essais de 1977

Des essais de chargements ont été effectués le 22/7/1977 à la suite de travaux de remise en état du pont qui était donc dans un état réparé.

Le pont était chargé dans sa partie centrale par deux files de deux camions : 12 t chacun avec la répartition : 4 t pour les essieux avants et 8 t pour les essieux arrières.

La flèche mesurée au centre du tablier est de 89.4 mm. Ce cas de charge, simulé par le modèle, donne une valeur de 85.6 mm.

La concordance des valeurs confirme le bon fonctionnement des poutres de rigidité après les travaux de réparation de 1977.

b - Les essais de 1992

Le pont a été chargé par un camion de 19 t excentré vers l'amont. Les flèches mesurées ont été : 104 mm côté amont, 61 mm côté aval.

La simulation de ce chargement conduit à des valeurs deux fois plus faibles. Ces résultats sont la conséquence de la corrosion des câbles et surtout de la dégradation des poutres de rigidité qui n'assurent plus pleinement le rôle de répartition des charges sur la suspension.

Dans cet état, l'analyse des résultats du calcul électronique révèle quelques dépassements de contraintes admissibles (pièces de pont, longerons, poutres de rigidité), sous l'effet des charges du système Bc.

Le pont ne peut donc pas recevoir les convois réglementaires constitués par les camions Bc de 30 tonnes.

Par contre, la simulation de convois de camions de 12 tonnes conduit à des valeurs réglementairement admissibles.

Le pont doit être limité à 12 tonnes en service normal, c'est-à-dire avec la possibilité de la présence simultanée de 4 camions de 12 tonnes sur le tablier. Des camions isolés plus lourds peuvent emprunter le pont, leur circulation doit toutefois être contrôlée, comme des convois exceptionnels.

b - Etat dégradé

La simulation de l'état dégradé, basée sur l'examen visuel des éléments constitutifs d'une part, et les essais d'épreuve d'autre part, montre que les convois de camions de 12 tonnes engendrent des contraintes inadmissibles dans certaines parties du pont.

En effet, les contraintes dans certains éléments de la structure sont deux fois plus importantes que la contrainte limite.

Ces résultats montrent que dans son état actuel, le passage du pont devrait être interdit aux véhicules de plus de 6 tonnes.