

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE

EN GENIE CIVIL

Option: Structures

Présenté par : Idjeri Fatma

THEME :

Analyse par modèle continu d'une passerelle suspendue rigidifiée par câbles précontraints: Bases de calcul et implémentation



Devant les membres du jury composé:

Kaci Salah
Sadaoui Arezki
Hammoum Hocine

Professeur
Professeur
MCA

U.M.M.Tizi-Ouzou
U.M.M.Tizi-Ouzou
U.M.M.Tizi-Ouzou

Président
Rapporteur
Examineur

Soutenu le :

TABLE DES MATIERES

Chapitre 1 : Introduction

1-1 Généralités	1
1-2 Etat de la question	2
1-3 Etat de la problématique et objectifs de ce travail	5
1-4 Revue et critique des études antérieures	6
1-4-1 Approche par modèle discret	6
1-4-2 Approche par modèle continu	7
1-4-3 Critique de ces études	8
1-5 Cheminement du travail suivi	9

Chapitre 2: Dégâts, surveillance, entretien et réparation des ponts suspendus

2-1 Généralités	11
2-2 Différents types d'ouvrages	11
2-3 Revue des causes et nature des désordres dans les différents éléments constitutifs	13
2-3-1 Massifs et chambres d'ancrage	13
2-3-2 Pylônes	14
2-3-3 Câbles et ancrages	15
2-3-4 Suspentes et attaches	17
2-3-5 Tablier	18
2-3-6 Appareils d'appuis	18
2-3-7 Organes d'attaches ou d'ancrage	19
2-4 Surveillance	20
2-5 Entretien	21
2-5-1 Entretien courant	21
2-5-2 Entretien spécialisé	21
2-6 Réparation	23
2-6-1 Comblement des chambres d'ancrage	23
2-6-2 Raccourcissement des câbles	23
2-6-3 Changement de suspension	24
2-6-4 Opérations sur les appareils d'appuis	25

Chapitre 3 : Principes et bases de calcul des ponts suspendus

3-1 Généralités	27
3-2 Principe de fonctionnement	27
3-3 Calcul des ponts suspendus	29
3-3-1 Méthodes de calcul et hypothèses de base	29
3-3-2 Equations fondamentales des ponts suspendus à poutres de rigidité	30
3-4 Réglage de la suspension	38
3-4-1 Réglage d'un ouvrage en construction	38
3-4-2 Réglage d'un ouvrage en service	40

Chapitre 4: Développements théoriques de la méthode de calcul

4-1 Généralités	41
4-2 Hypothèses principales	41
4-3 Formes initiales d'équilibres	42
4-3-1 Câble de rigidité	43
4-3-2 Câble principal	43
4-4 Formes d'équilibre sous charge (s)	43
4-5 Equation de la déformée	44
4-6 Formulation des poussées dans les câbles	44
4-6-1 Equation servant de base de calcul de la poussée	44
4-6-2 Application au cas d'un système vertical précontraint	47
4-7 Déformation des câbles	54
4-8 Efforts dans les suspentes	56
4-8-1 Traction concentrée	56
4-8-2 Traction répartie	56
4-9 Efforts dans les câbles	57

Chapitre 5 : Expérimentations numériques et analyses

5-1 Généralités	59
5-2 Description du programme BPCVER	59
5-2-1 Entrée des données	59
5-2-2 Organigramme général de calcul et principales fonctions associées	61
5-3 Expérimentation numérique et validation des résultats	62
5-3-1 Description de la structure	63
5-3-2 Résultats numériques et discussions	64
5-4 Analyse paramétrique	66
5-4-1 Exemple numérique	66
5-4-2 Paramètres principaux étudiés	68

Chapitre 6 : Conclusions générales

6-1 Rétrospective	80
6-3 Résultats obtenus	81
6-4 Recommandations futures	82
Références	83

Annexe A : Calcul des coefficients L_t et L_s

Annexe B : Coefficients associés à la transformation polynomiale des équations de poussées

Annexe C : Exemple d'utilisation du programme BPCVER sans analyse paramétrique (IR=1) appliqué à une structure suspendue dépourvue de haubans d'ancrage

Annexe D : Exemple d'utilisation du programme BPCVER avec analyse paramétrique (IR=0) appliqué à une structure suspendue pourvue de haubans d'ancrage

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1-1 Généralités

Les structures suspendues par câbles telles que les constructions traditionnelles des types ponts et tentes sont connues depuis les civilisations les plus anciennes. Cependant, comme la plupart de ces structures suspendues exigent des matériaux à haute résistance, il a fallu attendre la révolution industrielle où le fer est devenu abondant pour que ces structures deviennent réalisables. Ainsi, ont apparu très vite et particulièrement en Angleterre divers ponts suspendus impressionnants ayant déjà des travées assez considérables comme celui de Clifton (fig. 1-1) enjambant la vallée de l'Avon, construit vers 1900, dont la portée principale est de 214 m.

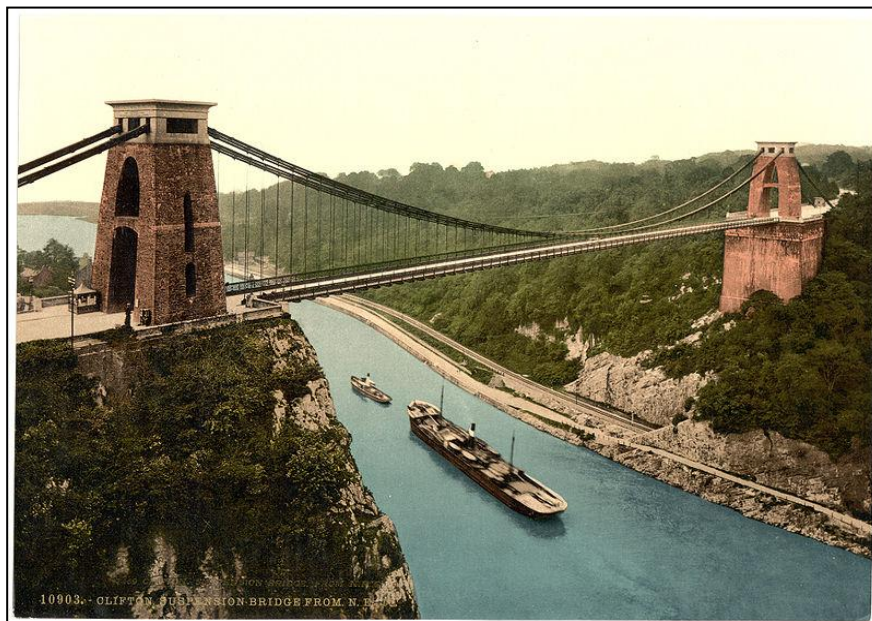


Figure 1-1: Vue du pont suspendu de Clifton en Angleterre, UK

Les ponts suspendus se sont par la suite développés durant le 19^{ème} siècle, et l'accroissement des portées devient réellement possible grâce à l'avènement technologique de l'acier. Les méthodes de calcul ont été alors raffinées, et graduellement il s'est avéré qu'une étude exacte doit tenir compte des non-linéarités géométriques de la structure i.e. les équations d'équilibre doivent être écrites dans la configuration déformée. Cette méthode (théorie du 2^{ème} ordre) a connu un développement considérable [1,2] de sorte que nous pouvons considérer, à l'heure d'aujourd'hui, la théorie des ponts suspendus comme relativement exacte.

Ce n'est toutefois pas le cas des structures de toitures suspendues qui sont plutôt relativement récentes. Leur apparition ne remonte guère qu'au début de notre siècle, et leur développement n'a réellement commencé que depuis les années quarante environ. Les constructions de ce type se distinguent essentiellement des ponts suspendus usuels par leur poids propre pratiquement insignifiant, poids propre qui au contraire, avec la présence d'un tablier et des poutres de rigidité, un facteur primordial dans la stabilité. Ce sont donc des structures très légères, généralement en forme de résilles (à configuration plane ou spatiale) composées de réseaux de câbles qui se prolongent jusqu'aux ancrages sur les fondations qui, d'appuis sur le sol, se transforme en lest. La figure 1-2 montre les câbles de contreventement d'une ossature métallique de la station de métro Erasme, Bruxelles, devant être couverte d'une toile tendue. Sur la photo de gauche, les câbles n'ont pas été complètement tendus. La photo de droite montre comment ces mêmes câbles peuvent être accrochés en tête de pile.



Figure 1-2: Structure de la toiture suspendue de la station du métro Erasme à Bruxelles

1-2 Etat de la question

L'utilisation des systèmes par câbles dans la construction constitue tant sur le plan architectural que technique une évolution conceptuelle importante dans l'art de construire. Leurs avantages, permettant à la fois d'augmenter la portée et de réduire le poids propre, répondent d'une manière radicale au problème longtemps posé dans la réalisation des grandes portées qui sont requises par les constructions civiles et industrielles aussi bien que par les constructions des ouvrages de ponts suspendus usuels indispensables pour franchir des vallées, des rivières et des bras de mer d'une ampleur considérable [3,4,5,6].

Ces systèmes réputés légers emploient comme principal élément le câble dont l'équilibre des charges est réalisé uniquement par des efforts de traction pure, développés parallèlement à la fibre moyenne du câble. Cela signifie qu'aucune rigidité flexionnelle ou de compression n'est attribuée au système par opposition aux structures classiques en portique ou en treillis. De cette caractéristique découle la nécessité pratique de mise en tension préalable à toute utilisation, et dont l'effet joue un rôle extrêmement important dans la stabilité des structures correspondantes dont le poids propre demeure particulièrement faible. Cette pré-tension, également appelée précontrainte, représente la charge qu'il est nécessaire d'intégrer initialement à une résille pour qu'en aucun cas de surcharge, l'un quelconque des éléments de cette résille ne risque d'être virtuellement comprimé i.e tendu. On ne peut cependant faire abstraction de la vulnérabilité de ce type de structures aux problèmes de stabilité liés principalement au flottement et à la résonance, qui doivent à priori recevoir une grande attention ; l'étude du comportement dynamique devient par conséquent importante. Il faut en outre considérer la non linéarité géométrique qui joue un rôle significatif dans un système léger et aussi déformable qu'est le système à câble [3,7,8]

Le système auquel nous allons nous intéresser dans ce travail consiste en un système plan vertical à câbles précontraints, de courbures inversées, équivalent à un pont suspendu dont les poutres de rigidité sont représentées par des câbles auxiliaires précontraints appelés câbles de rigidité. Comme représenté sur la figure 1-3, ce système se compose principalement d'une nappe de suspentes verticales réunissant deux câbles principaux à savoir le câble porteur ou principal et le câble tendeur ou de rigidité qui sont fixés en leurs extrémités à des massifs d'ancrage. Deux systèmes de ce type peuvent supporter un tablier léger que nous pouvons supposer dépourvu de rigidité propre appréciable. Ce qui peut nous permettre de songer dans le cas pratique à une passerelle piétonnière très flexible (fig. 1-4) dont l'implantation sera très intéressante dans des sites d'attraction ou à un ouvrage connu sous le nom de catérail assurant le passage d'un wagonnet accroché à un rail solidaire du système de suspension. Nous pourrions également songer dans une moindre mesure à l'usage comme moyen de transport en commun à l'exemple de téléphérique (bicâble, fig. 1-5) ou de télécabine (monocâble, fig. 1-6) fortement appréciés et notamment privilégiés ces derniers temps en Algérie ; à l'image de celui actuellement en construction dans la ville de Tizi-ouzou devant relier la gare modale de Bouhinoun au mont de Redjaoua dont les travaux s'éternisent et la réception du projet pourtant si important semblent remis aux calendes grecques. Ce mode de transport par câbles aérien est généralement utilisé pour gravir un relief pentu et très accidenté ou franchir une dépression géographique (vallée, voie d'eau, montagne dans les stations de ski ou encore en milieu urbain pour la desserte d'un terrain communal au relief difficile) dans le but de se soustraire à des contraintes topographiques.

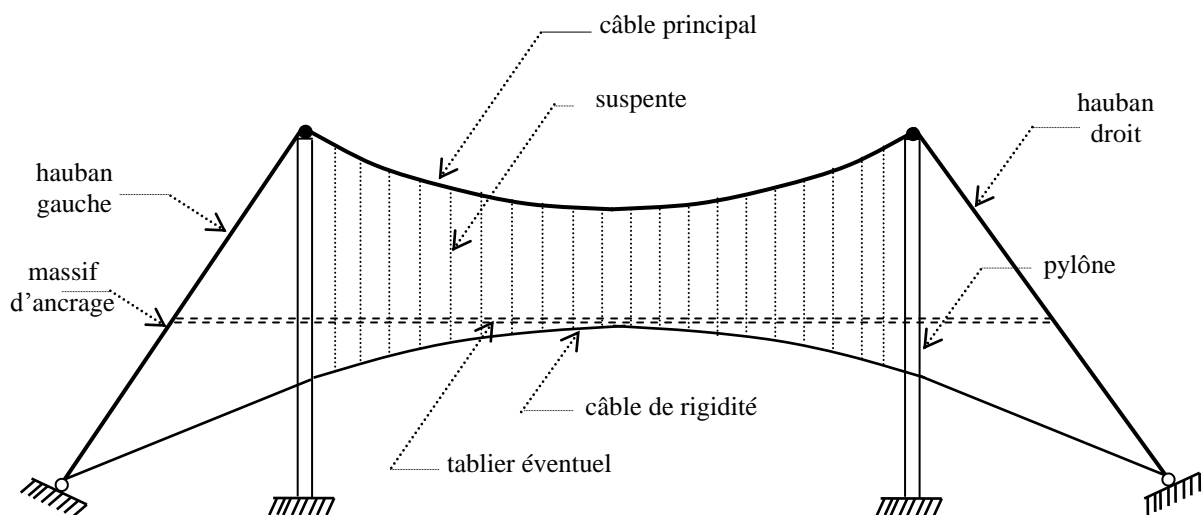


Figure 1-3: Description d'un système vertical précontraint



Figure 1-4: Passerelle piétonnière suspendue rigidifiée par des câbles précontraints



Figure 1-5 : Vue du téléphérique de Renon, Italie



Figure 1-6 : Vue d'une télécabine entre Oued Koriche et Bouzaréah, Alger

1-3 Etat de la problématique et objectifs de ce travail

Les réseaux à câbles dont sont composés les structures suspendues sont essentiellement des systèmes discrets, et peuvent être traités comme tels soit par éléments finis. Cependant, si le nombre des câbles dans le réseau devient élevé, il est possible d'approximer le réseau par un système continu conduisant à une méthode d'analyse de nature analytique. Par suite, la modélisation mathématique d'un réseau à câble peut s'effectuer par l'approche fondamentale qui assimile le comportement de la nappe des suspentes verticales à un voile continu et inextensible [9,10,11]. Les équations à caractère non linéaire résultantes décrivant les tractées ou les poussées dans les câbles seront établies de façon à être résolues par la méthode de Newton-Raphson à double itération. Par ailleurs, il y a lieu de rappeler que le comportement caractéristique des systèmes suspendus en général est fondamentalement non linéaire; cela signifie d'une autre manière que les équations d'équilibre fondamentales doivent être formulées par référence à la configuration non déformée [12].

Le but principal de ce travail consiste de développer une méthode d'analyse simple, mais suffisamment précise et fiable, permettant d'aborder le calcul d'un ouvrage suspendu léger sans poutre de rigidité, telle une passerelle suspendue rigidifiée par câbles précontraints. A ceci vont se greffer deux autres objectifs complémentaires aussi importants que la méthode elle-même. Le premier est de mettre en évidence, à travers une analyse paramétrique appropriée, l'effet de certains paramètres sur le comportement de la structure comme la cambrure et la pré-tension du câble de rigidité. Le deuxième consiste à établir les valeurs critiques des paramètres les plus influents à partir desquels la non linéarité du système se révèle significative suivant des critères admis.

1-4 Revue et critique des études antérieures

La littérature sur les concepts de base des structures suspendues légères remonte à l'architecte allemand F. Otto qui, à travers ses publications, a su révéler l'attrait et l'importance de ces structures, que Schleyer [13] est venu appuyer plus tard par sa théorie de la membrane appliquée aux réseaux à câbles. Ensuite, Massimo [14] et Möllman [15] ont donné une nouvelle stimulation à ce thème en introduisant la notion de discrétisation de la structure, devenant désormais un domaine de recherche continue.

Les réseaux à câbles dont sont composées ces structures suspendues sont essentiellement des systèmes discrets, et peuvent être traités comme tels. Cependant, si le nombre des câbles dans le réseau est élevé, il est possible d'approximer le réseau par un système continu. Par conséquent, la modélisation mathématique d'un réseau à câbles peut s'effectuer suivant ces deux approches distinctes conduisant à des méthodes de calcul numérique ou analytique dont nous allons subséquemment faire brièvement le point sur l'état actuel des recherches. Il est, en outre, à rappeler que le comportement caractéristique des systèmes suspendus en général est fondamentalement non linéaire signifiant, en d'autres termes, que les équations d'équilibre fondamentales doivent être formulées par référence à la configuration déformée.

1-4-1 Approche par modèle discret

La structure réelle est simulée par un ensemble d'éléments interconnectés à un nombre fini de points nodaux sur lesquels le chargement est supposé concentré (fig. 1-6). La compatibilité géométrique et l'équilibre aux nœuds se traduisent par un système d'équations algébriques à caractère non linéaire dont la résolution fait appel à des méthodes itératives appropriées. Une attention particulière doit être cependant apportée au risque d'une « compression » (détente) éventuelle d'un élément au cours du procédé itératif. Il faut alors, dans ce cas, annuler simplement la rigidité de l'élément en question ainsi que sont effort de « compression » correspondant avant de passer au cycle d'itération suivant. Si le nombre d'éléments « comprimés » est assez élevé, l'instabilité de la structure devient évidemment inévitable.

En 1971, une mise au point des méthodes d'analyse numérique des structures légères a été faite au cours d'un symposium [16], tenu au Japon sur les structures prétendues présentant une revue détaillée et une évaluation précise de tout ce qui a été fait dans ce domaine. Les méthodes proposées sont générales et leur application est suivie la plupart du temps de vérifications expérimentales dans le cas des très grandes constructions. Les hypothèses admises mettent en jeu essentiellement les points suivants :

- Connaissance de la forme initiale ;
- Propriétés élastiques du matériau ;
- Faible rapport à vide flèche/portée, la portée représentant la distance horizontale entre les points d'accrochage. Cela suppose une structure aux tensions initiales élevées, de sorte que le tronçon de câble reliant deux nœuds consécutifs est quasi rectiligne.

Soulignons toutefois qu'il existe des procédés plus généraux qui introduisent mieux le comportement physique de la structure en faisant allusion particulièrement à la courbure de l'élément de câble [15,17,18,7] et au comportement élastoplastique des matériaux utilisés. Peu d'intérêt cependant semble être accordé à l'élasto-plasticité, vu la possibilité d'une exploitation optimale du matériau en traction pure, qui permet une valeur élevée du rapport résistance/poids de la structure. La détermination exacte de la forme initiale demeure cependant onéreuse [3], notamment pour des configurations géométriques complexes. Selon Krishna [19], en raison de la longueur et de la lourdeur inouïe des calculs nécessaires à cet égard, un choix judicieux des valeurs initiales des coordonnées est parfois meilleur que toute approche mathématique approfondie.

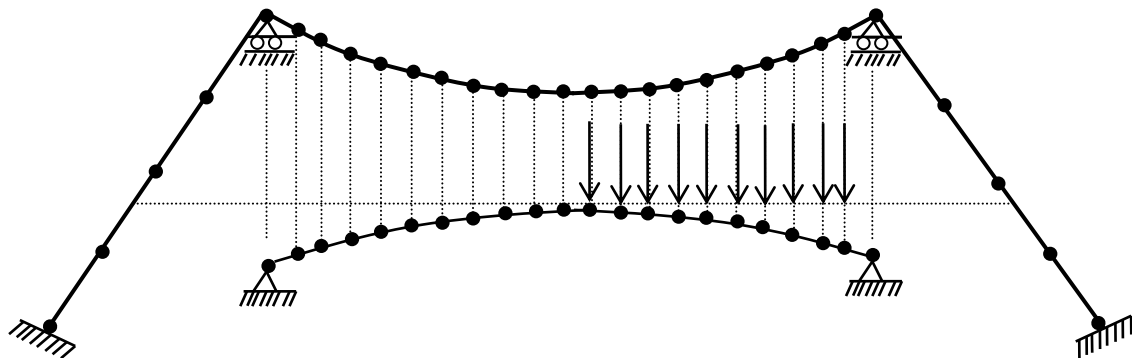


Figure 1-6: Approche discrétisée par éléments finis

1-4-2 Approche par modèle continu

Un système à l'origine discret forme, lorsque ses éléments sont suffisamment rapprochés, un milieu quasi continu. Apriori, une telle situation ne peut se produire que lorsque les charges sont elles-mêmes continues, donc réparties le long du câble. Dans de telles conditions, une structure en résille est assimilable à une membrane incapable d'absorber des efforts de cisaillement ou de compression. La figure 1-7 montre la discontinuité réelle de la membrane qui établit une différence de fait avec la parfaite continuité admise dans la théorie classique. La formulation mathématique se caractérise généralement par des systèmes d'équations différentielles partielles, intégrales ou intégro-différentielles. Tel que mentionné précédemment, le document F. Otto peut constituer une excellente référence de base pour l'étude des systèmes continus de réseaux de câbles. Les théories qui y sont présentées, ont été mieux élaborées ultérieurement par Tottenham et William [20] ; elles rejoignent justement par certaines hypothèses la théorie usuelle de la membrane dans le traitement des coques. Le réseau de câbles est assimilé à une plaque très mince réduite à son feuillet moyen dont l'état de contrainte reflète seulement la traction.

Encore plus récemment, des approches de nature analytique exploitant fondamentalement l'hypothèse de la continuité parfaite de la nappe des suspentes en les assimilant à un voile continu et inextensible, sont rapportées par Chen et al. [10] et Kmet et Kokorudova [33] en vue de l'analyse des systèmes suspendus type passerelle rigidifiée par câbles précontraints dont les charges sont verticales et appliquées dans son propre plan. Les fondements théoriques utilisés, qui serviront d'ailleurs, d'étalon de comparaison à la méthode simplifiée que nous songeons d'établir dans le cadre de ce travail, se limitent aux considérations suivantes :

- poids total de l'ouvrage nul au moment du réglage initial ;
- absence des haubans d'ancrage ;
- chargement réparti uniquement appliqué soit sur la totalité ou la moitié du tablier ;
- aucune possibilité éventuelle d'une simultanéité de charges réparties et ni présence quelconque de charges concentrées sur le tablier.

Par ailleurs, nous citons une autre théorie dite des structures hyperstatiques d'ordre infini, élaborée à l'origine par Courbon [21] pour l'étude des systèmes tels que les poutres solidarisiées par des suspentes infiniment rapprochées et les ponts à poutres multiples. L'état d'équilibre de la structure est déterminé au moyen des équations de la statique dès que l'on connaît les densités des réactions exercées par les suspentes ou les organes de liaison entre groupes de poutres. Cette méthode, plutôt adéquate sous l'action des charges horizontales, se base de façon fondamentale sur le principe de superposition dans l'évaluation des coefficients d'influence qu'exige le calcul des réactions. Elle présuppose donc la linéarité de fonctionnement dans le domaine d'intégration, en particulier la linéarité statique que rendent possible les petites déformations.

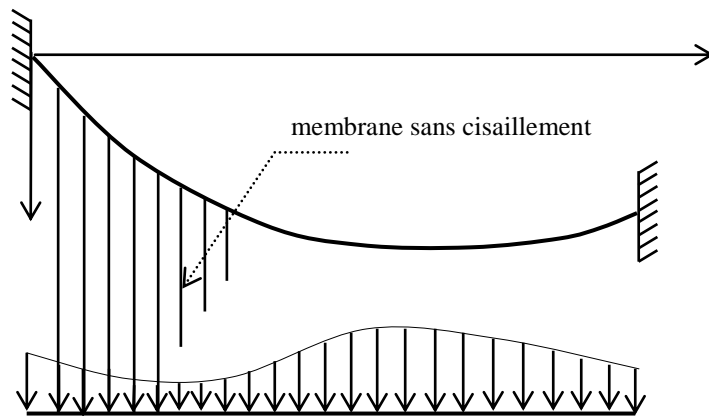


Figure 1-7: Approche par modèle continu

1-4-3 Critique de ces études

Il ressort que le modèle continu ne peut refléter d'une manière exacte une structure discontinue à l'origine. De plus, pour des cas de géométries et de conditions aux limites complexes, les équations analytiques obtenues sont souvent impuissantes à apporter une solution précise. Par conséquent, seules les méthodes numériques comme par la méthode par éléments finis se présentent comme rigoureuses pour la simulation des structures résillées.

Cependant, il apparait fréquemment un désavantage sur le plan pratique, car on est amené à traiter un grand nombre d'équations non-linéaires, ce qui exige des moyens considérables. A ce propos, quelques simplifications que nous énumérons ci-après sont proposées qui se révèlent utiles pour une analyse préliminaire de la structure.

- Négliger les déplacements horizontaux : dans un système à câbles, les déplacements horizontaux sont habituellement petits par rapport aux translations verticales. Siev et Eidelman [22] suggèrent qu'ils soient alors négligés réduisant

alors de trois à un le nombre des degrés de liberté d'un nœud. Cette simplification se justifie dans les systèmes où le rapport flèche/travée demeure faible.

- Négliger les termes non-linéaires : la réponse d'un réseau de câbles est fondamentalement non linéaire. Cependant, quand les charges sont faibles, la courbe charge-déplacement prend une allure quasi linéaire [23]. Il est donc possible, dans ce cas, d'ignorer les termes non linéaires et conséquemment d'éviter le cycle itératif de la solution [21,24].
- Groupement de câbles: la procédure suivante peut se réaliser dans le cas d'un réseau constitué d'un très grand nombre de câbles. Un certain nombre de câbles peuvent être regroupés pour n'en former qu'un seul, ce qui, pour fin d'analyse réduit le nombre de nœuds. On montre que, pour des treillis de câbles, cette modélisation moins fine donne des résultats nettement acceptables [25].

1-4 Cheminement du travail suivi

Le travail présenté dans ce mémoire sera organisé en 6 chapitres dont le présent premier chapitre en guise d'introduction est consacré essentiellement à la nature de la problématique et de la question des structures suspendues légères ainsi à la description des objectifs fixés. Plusieurs points sont abordés dont la revue des méthodes de calcul antérieures qui mettent en relief que la modélisation mathématique des réseaux à câbles formant ces structures suspendues peut s'effectuer suivant approches distinctes soit par modèle continu qui assimile le comportement de la nappe des suspentes à un voile continu et inextensible soit par modèle discret qui considère la structure en tant que telle i.e discontinue à l'origine.

Le chapitre deux sera consacré en quelques sortes à l'anatomie des ponts suspendus en général dans le but de mettre en relief les aspects méconnus du fonctionnement de ce type d'ouvrages. L'accent est particulièrement mis sur l'analyse des causes et de la nature des dommages des différents éléments constitutifs où il convient d'y porter une attention particulière car, contrairement à la plupart des autres structures usuelles, 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.

Le chapitre suivant se rapportera à l'examen des principes de base de calcul d'un pont suspendu afin de comprendre les fondements théoriques qui seront apportées au chapitre suivant permettant de décrire le comportement type d'un ouvrage suspendu précontraint dépourvu de poutres de rigidité. Nous montrons principalement comment formuler les équations fondamentales qui régissent la théorie des ponts suspendus à poutre de rigidité conduisant à une équation non linéaire de la poussée dans les câbles dont la résolution fait nécessaire le recours à un processus itératif. Seront également revues les différentes techniques de réglage de la suspension où un défaut quelconque de l'un de ses éléments peut conduire à des conséquences graves allant jusqu'à la ruine complète de l'ouvrage à cause de la stabilité du tablier qui s'en trouve directement affectée.

Le chapitre quatre aura trait à l'exposé des fondements théoriques de base de la méthode de calcul d'un système vertical précontraint sans poutre de rigidité en utilisant l'approche fondamentale qui assimile le comportement de la nappe des suspentes à celui d'un voile

continu et inextensible. Les équations à caractère non linéaire décrivant les tractées dans les câbles sont établies de façon à être résolues par la méthode de Newton-Raphson à double itération. On suppose de plus, par analogie avec la théorie des ponts suspendus à poutre de rigidité, que les câbles reposent sur les pylônes par l'intermédiaire de chariots de dilatation, afin qu'aucune réaction horizontale ne puisse s'exercer sur les pylônes.

L'avant dernier chapitre sera consacré à l'implémentation numérique et à l'analyse des résultats où dans un premier temps nous décrirons le programme de la méthode ainsi établie par des applications numériques portant sur l'analyse d'un ouvrage type de pont suspendu léger et sans poutre de rigidité soumis à l'action de charges verticales appliquées dans le plan général du système. Dans un deuxième temps, nous effectuerons une analyse paramétrique appropriée afin de mettre en évidence certains paramètres clés les plus influents sur le comportement de la structure comme la cambrure et la pré-tension du câble de rigidité tout en portant attention à la non-linéarité qui pourrait se révéler simultanément.

Nous terminerons en guise de dernier chapitre par une conclusion générale suivie par quelques recommandations pour l'amélioration et la poursuite de ce travail.

CHAPITRE 2

DEGATS, SURVEILLANCE, ENTRETIEN ET REPARATION DES PONTS SUSPENDUS

2-1 Généralités

Il s'agit dans ce chapitre, sans être exhaustif, de faire une sorte de « précis anatomie » des ponts suspendus dans le but de mettre en relief les aspects méconnus du fonctionnement de ce type d'ouvrages. La présentation s'articule sur trois parties dont la première consiste en une description sommaire des principaux ponts suspendus rencontrés dans la vie pratique. La deuxième est consacrée à l'analyse des causes et la nature des désordres des différents éléments constitutifs où 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. La troisième partie se rapporte enfin à la méthodologie générale de surveillance et de maintenance permettant de déceler les désordres pour une éventuelle réparation ou, plus subtilement, d'apprécier les indices pouvant en laisser supposer.

2-2 Différents types d'ouvrages

Les ponts suspendus se présentent sous la forme d'une structure comportant :

- un tablier assurant la continuité de la voie portée, et le plus souvent, la répartition des charges ;
- des suspentes supportant le tablier et transmettent les charges aux câbles ;
- des câbles d'allure parabolique, assurant la fonction porteuse dont les efforts sont équilibrés par i) une réaction verticale absorbée par les pylônes ii) un effort de traction transmis par les câbles de retenue appelés haubans, amarrés sur des massifs d'ancrage, excepté dans le cas des ouvrages dits auto-ancrés appelés haubanés comme dans le cas des ponts réputés haubanés où les câbles sont amarrés aussi dans le tablier. C'est l'exemple du pont à une seule travée de Constantine (fig. 2-1) qui est construit dans les années 1910-12, long de 164 m et large de 5.75 m surplombant les gorges à 175 m au dessus de Rhumel.

Dans le cas des ouvrages à travées multiples (fig. 2-2), les efforts de traction induits par les charges roulantes sont transmis jusqu'aux câbles de retenue par des câbles accrochés sur des selles ou des chariots mobiles en tête des pylônes appelés câbles de tête. En général, les câbles de retenue, situés entre les ancrages et les pylônes, ne supportent pas de charge. Les suspentes verticales peuvent être complétées dans ce cas par des haubans inclinés donnant lieu à une autre catégorie de pont suspendus dits haubanés (fig. 2-3) dans le but de réduire sensiblement les déformations des câbles. Cependant, dans le cas des suspensions de type Giscard (fig. 2-4), les câbles paraboliques sont remplacés par un réseau de haubans raccordés par des câbles subhorizontaux, reprenant les efforts de traction.



Figure 2-1: Pont Sidi M'Cid de Constantine surplombant les gorges de Rhumel



Figure 2-2: Pont routier Pierre-Laporte, Québec city, à trois travées et long de 1041 m
(travée principale : 668 m, hauteur : 116 m)

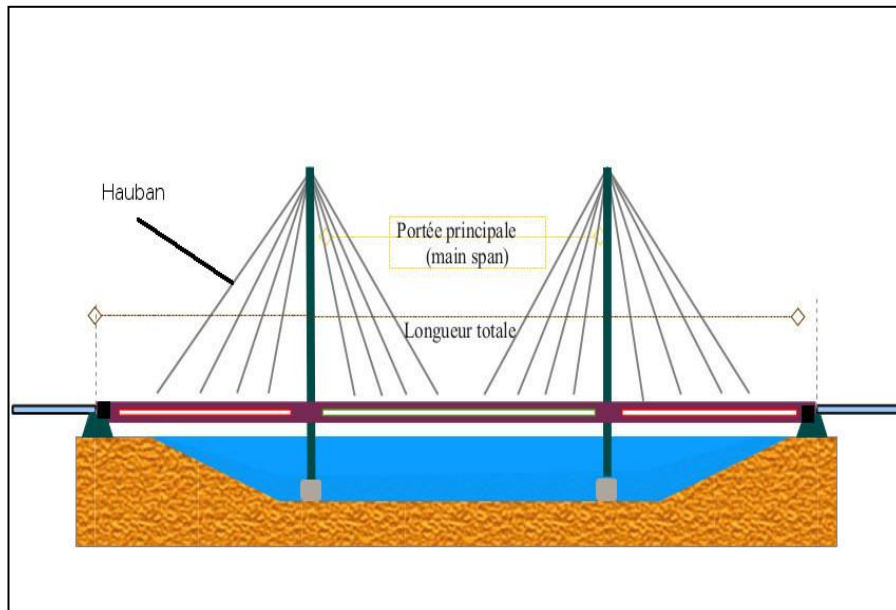


Figure 2-3: Pont type haubané comme celui de Sidi Merouane à Mila

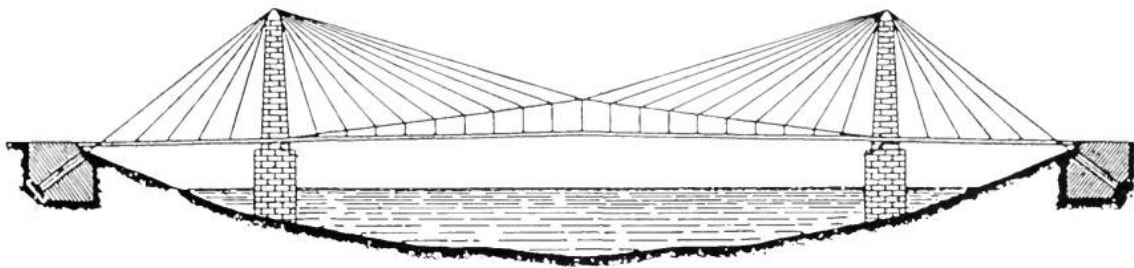


Figure 2-4: Pont suspendu de type Giscard

Notons que le type de structure décrit ci-dessus, à l'exception des ponts de type Giscard, se caractérise par sa souplesse. Il en résulte un certain nombre de dispositions spécifiques comprenant de nombreuses variantes que nous suggérons la référence [26] pour de plus amples informations. On peut toutefois relever que pour les éléments constitutifs des ponts suspendus, même les éléments présents dans d'autres types de structures, tels que les tabliers ou les appareils d'appuis, présentent des particularités résultantes du mode de fonctionnement spécifique aux ponts suspendus, et que les autres éléments (pylônes, câbles, massifs d'ancrage, suspentes, organes de liaison) ont une fonction caractéristique importante pour le bon fonctionnement des ouvrages.

2-3 Revue des causes et nature des désordres dans les différents éléments constitutifs

2-3-1 Massifs et chambres d'ancrage

Conçus pour reprendre les efforts de traction des câbles de retenue, les massifs et chambres d'ancrage présentent rarement des désordres d'ensemble. Lorsque ceux-ci existent, il s'agit des déplacements dus à une instabilité de terrain provoquée par des affouillements

suite à une crue, ou plus rarement de fracturations dans la masse de massifs ancrés en maçonnerie (fig. 2-5).

Quelque soit la cause, il s'agit des désordres graves mettant en jeu la sécurité de l'ouvrage. En fait, les désordres sont plus souvent constatés sur les câbles ou organes d'ancrage des câbles situés dans les chambres, galeries ou puits d'ancrage dont l'humidité permanente favorise les phénomènes de corrosion.

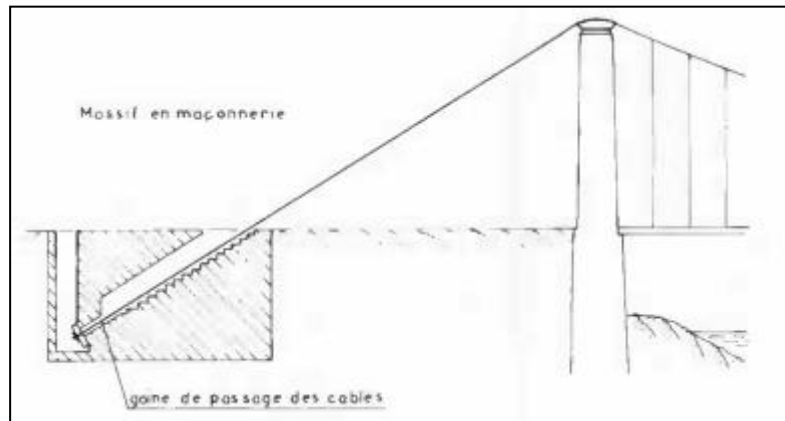


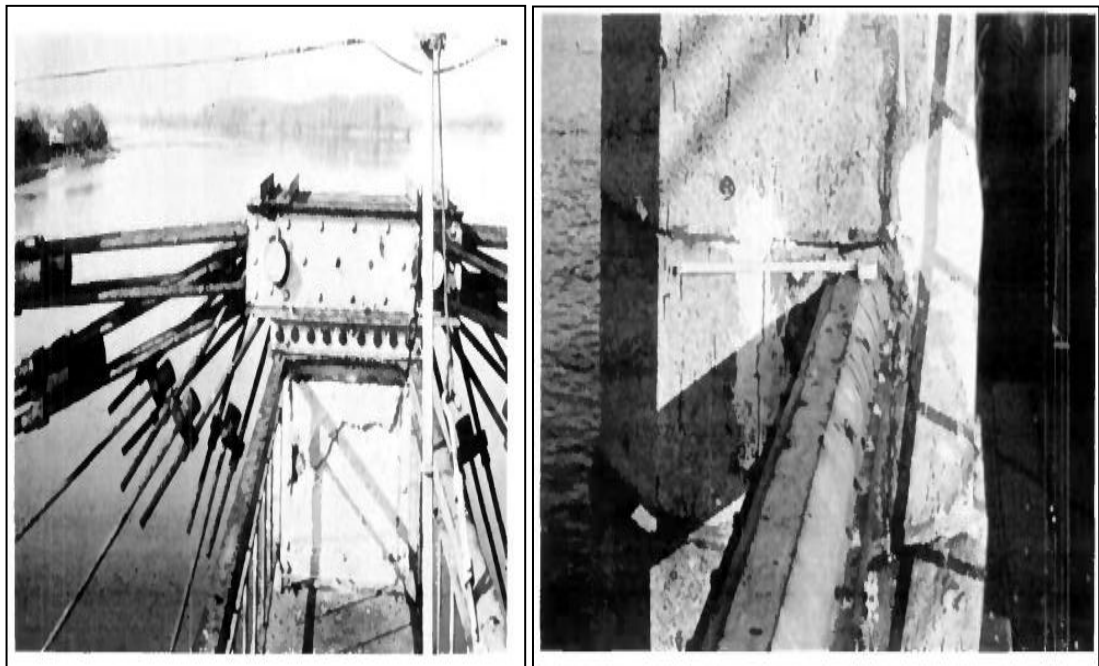
Figure 2-5: Exemple d'un massif d'ancrage des câbles

2-3-2 Pylônes

Les pylônes peuvent être de trois types :

- encastrés rigides i.e peu déformables : ils sont équipés en tête de selles ou de chariots mobiles sur lesquels viennent s'accrocher les câbles porteurs et, le cas échéant, les câbles de tête. La mobilité des selles et des chariots est assurée par des rouleaux ou des fléaux. Les poussières, la corrosion conduisent peu à peu à un grippage de ces éléments, voire un blocage complet; les pylônes sont alors soumis, au passage des charges, à des efforts importants pour lesquels ils ne sont pas conçus et qui produisent des désorganisations pouvant conduire à des fissures en tête de pylône (fig. 2-6a) soit, sous l'effet de la flexion, à une rupture à la base (fig. 2-6b).
- encastrés flexibles, en acier ou en béton armé, ils sont à l'inverse des précédents, solidarisés avec les câbles porteurs. Les déplacements de ceux-ci, au passage des charges, induisent des déformations de flexion dans le corps des pylônes qui sont dimensionnés en conséquence. Cependant, les zones d'encastrement en pied restent des zones sensibles. De même, lorsque les déplacements des câbles porteurs sont trop importants, on peut assister à un glissement de ces derniers sur les selles, voire à une désolidarisation des selles et de la tête des pylônes. En outre, dans le cas des portiques, des charges dissymétriques sollicitent ces derniers en torsion ; soumise alors à des efforts de torsion, la traverse supérieure, trop ou insuffisamment rigide peut présenter des fissurations.
- articulés en pieds : ils ne sont en règle générale, calculés que pour résister aux efforts de compression. Un bon fonctionnement de l'articulation est alors capital,

sous peine de désordres engendrés par des moments de flexion parasites comme le flambement.



a) en tête de pylône

b) à la base du pylône

Figure 2-6 Conséquences de blocage d'une selle d'appui

2-3-3 Câbles et ancrages

Les câbles les plus utilisés dans les ponts suspendus sont des câbles du type toronné i.e qu'ils sont constitués des fils d'acier enroulés hélicoïdalement autour d'un fil central appelé âme, en plusieurs couches de pas inversés (fig.2-7). Ils ont une très haute limite d'élasticité atteignant plusieurs fois celle de l'acier traditionnel de charpente métallique. Les torons dont sont ainsi formés les câbles peuvent contenir des centaines de fils et atteindre des limites de rupture de plusieurs centaines de tonnes. Leur module d'élasticité intrinsèque est plus petit que celui du matériau en acier à cause de l'enroulement des fils en hélice ou une valeur de 170000MPa n'est pas rare.

On parle ainsi de câbles à torons parallèles lorsque les câbles sont constitués d'un ensemble de torons alignés. Quand ils sont constitués d'un ensemble de torons enroulés autour d'une âme centrale métallique ou textile, on parle alors de cordages. Les cordages possèdent un module d'élasticité intrinsèque encore plus faible, qui peut être inférieur à 140000 MPa.

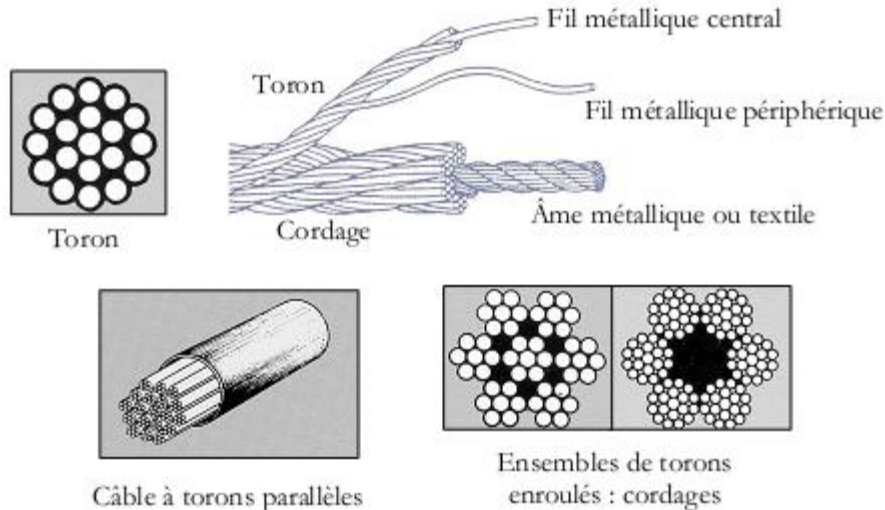


Figure 2-7: Câbles à torons parallèles et enroulés

Cependant, la structure des câbles n'assure pas l'étanchéité vis-à-vis de ruissellement (fig. 2-8), même dans le cas des câbles clos où les fils des couches extérieures sont profilés de façon à s'emboîter les uns dans les autres, et malgré l'application de produits de protection dont la gamme s'étend de brais de houille et goudrons aux peintures époxy ou polyuréthane. Les câbles sont donc le siège d'une circulation quasi-permanente provoquant, même si les fils constitutifs sont galvanisés, des phénomènes de corrosion aux points de rétention. La localisation de ces points dépend de la disposition géométrique de la suspension. Lorsque les câbles sont disposés en nappe, on peut retenir les points suivants :

- le bas des câbles de retenue, près des culots, particulièrement dans les chambres d'ancrage humides ;
- la partie basse de la parabole (fig. 2-9);
- le bas des haubans lorsqu'il existe, près des culots ;
- accessoirement à l'intérieur des câbles d'attache des suspentes, bien que ceux-ci sont en général de dimensions réduites.

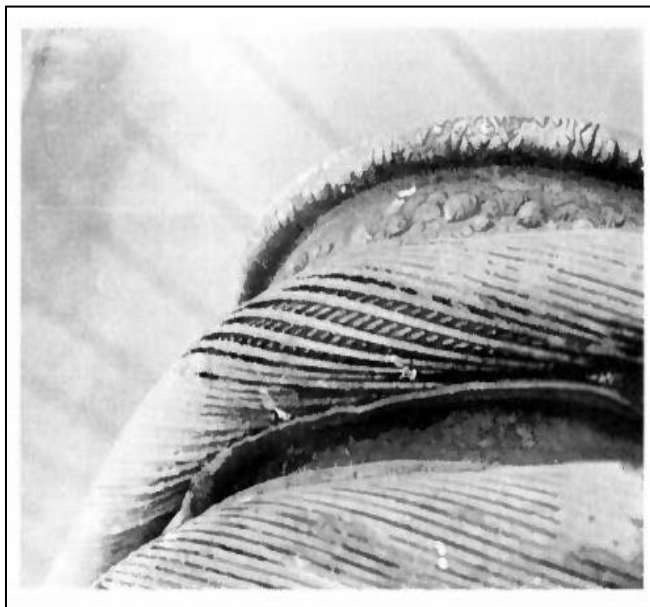


Figure 2-8: Détoronnage d'un câble, constituant une entrée d'eau

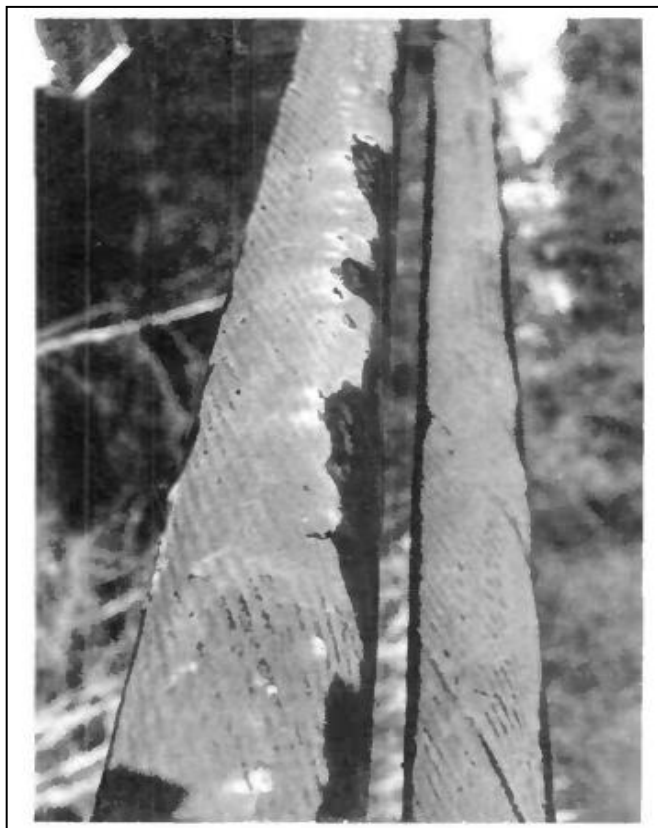


Figure 2-9: Retenue d'eau dans un câble dans la partie basse de la parabole

Par ailleurs, d'autres désordres peuvent apparaître, conséquence d'un mauvais comportement de l'ouvrage. Du fait de sa souplesse, la structure des ponts suspendus constitue une amplification des phénomènes dynamiques dus au passage des charges ; ces derniers se répercutent en tout point de la structure. En particulier, les ancrages des câbles i.e les culots, constituant un point fixe, peut être soumis à des efforts brutaux. Si l'alliage de remplissage présente une trop grande ductilité ou si le remplissage est défectueux, on peut assister à une rentrée du bloc câble-alliage à l'intérieur du culot et à un laminage progressif au niveau de la sortie de câble qui forme filière. Sans aller jusqu'à un échappement complet de l'ancrage, un tel phénomène entraîne un dérèglement notable de la suspension 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.

2-3-4 Suspentes et attaches

Il existe trois types de suspentes : en fer forgé, en câble et en barre. Elles sont munies en partie haute d'attaches sur les câbles porteurs, en partie basse d'attaches sur le tablier ; celles-ci affectent des formes diverses, dépendant de la géométrie de la suspension et de la nature du tablier. Les suspentes en fer forgé, les plus anciennes, sont en général, monobloc avec leurs attaches constituées d'étrier. Elles présentent peu de désordres, hormis le risque de poinçonnement des fils périphériques des câbles porteurs, en raison de l'augmentation progressive des charges roulantes. Les suspentes en câble présentent, vis-à-vis de la corrosion, les mêmes risques que les câbles porteurs, la localisation se situant alors au niveau des culots d'extrémités situés en partie basse i.e au niveau du tablier (fig. 2-10). Les suspentes en barre

quant à elles, présentent peu de risque de corrosion en partie courante. Par contre, elles ne sont pas conçues pour subir les moments de flexion alternés dus aux mouvements relatifs du tablier et de la suspension. Leurs attaches doivent constituer des articulations efficaces ; certains dispositifs d'attaches en partie basse, du fait de leur constitution, sont un lieu de concentration de contraintes, pouvant engendrer des fissurations au niveau du filetage, et de rétention d'humidité, favorisant les phénomènes de corrosion.

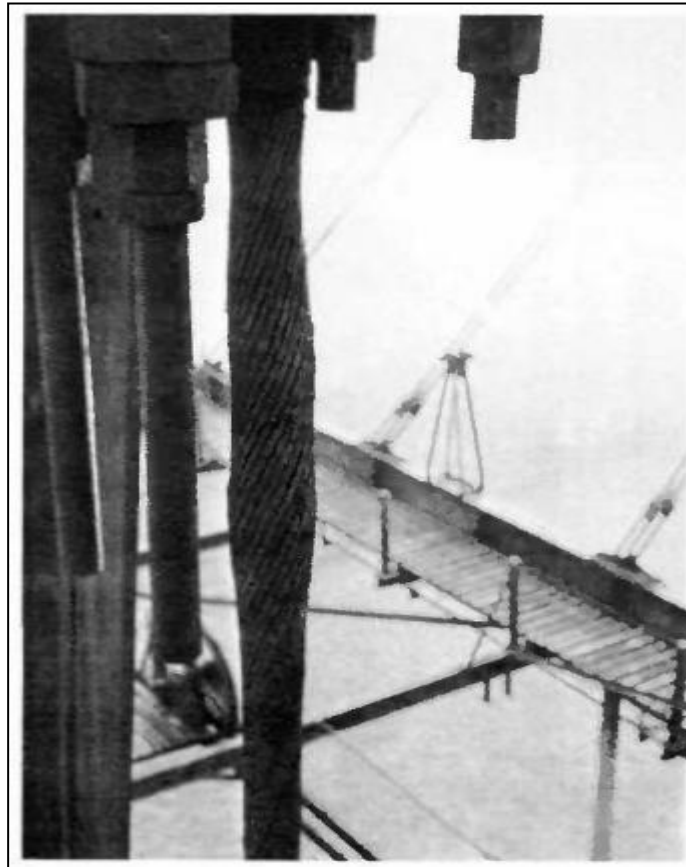


Figure 2-10: Corrosion d'une suspente en câble

Par ailleurs, ces trois types de suspentes sont soumis aux mêmes phénomènes dynamiques que les câbles porteurs. Ces sollicitations se font particulièrement sentir au niveau des attaches sur les câbles porteurs, notamment en partie haute de la parabole, près des points fixes constitués par les têtes de pylônes et là où l'angle avec l'horizontale est le plus accusé. On peut alors assister à des ruptures de ligature de fixation des attaches en fer forgé ou à un desserrage des colliers favorisé par la relaxation des boulons de serrage ; il s'ensuit un glissement avec dérèglement de la suspension et report des efforts sur les suspentes voisines, d'où un effort de réaction en chaîne. Au niveau des attaches sur le tablier, les risques de désordre sont essentiellement ceux mentionnés pour les suspentes en barres d'acier, ainsi que des risques de desserrage des écrous de butée entraînant un dérèglement de la suspension.

2-3-5 Tablier

Les tabliers des ponts suspendus présentent des désordres liés le plus souvent à un dérèglement de la suspension. Dans les ouvrages les plus anciens, l'absence de poutre de rigidité

conduit à considérer la structure du tablier comme une suite d'éléments articulés et attachés individuellement à des suspentes. La défaillance de ces dernières, ou le glissement de leurs attaches sur les câbles conduit à des déformations de l'élément correspondant, à des efforts excessifs voire à des ruptures de pièces. Sur les ouvrages comportant des poutres de rigidité, il peut se produire une déformation de ces dernières :

- déformation générale en profil en long, sous charge permanente, due le plus souvent à un dérèglement de la suspension ;
- déformation générale en plan, souvent concomitante à une torsion du profil en long ; il s'agit alors d'un déversement du à un excès de compression de la de la membrure supérieure (fig. 2-11) ;
- déformation localisée, conséquence d'une instabilité de forme due soit à un dérèglement de la suspension, soit au passage d'une charge excessive.

Ainsi, les désordres spécifiques constatés au niveau des câbles des ponts suspendus ne sont pas liés à des causes intrinsèques mais, en général, à des anomalies qu'il faut rechercher au niveau de la suspension.



Figure 2-11: Déversement d'une membrure supérieure d'une poutre de rive suite au dérèglement de la suspension

2-3-6 Appareils d'appuis

Alors que dans la plupart des autres ouvrages de ponts, où ils servent le plus souvent à transmettre des réactions positives et à permettre la libre dilatation des tabliers, une anomalie au niveau des appareils d'appuis entraîne rarement des désordres graves. Il n'en est pas de même dans le cas des ponts suspendus où ils jouent un rôle bien plus important dans la mesure i) où ils transmettent des réactions d'appuis verticales rapidement variables et alternées ii) où ils subissent des déplacements ou des efforts longitudinaux importants, alternés et inégaux au passage des charges iii) où ils reprennent les efforts transversaux dus au vent, importants en regard des efforts verticaux.

La présence des efforts tridirectionnels et rapidement variables conduit à une usure prématurée des appareils d'appuis qui sont dimensionnés par rapport aux actions d'un trafic lourd de plus en plus agressif. Cette usure entraîne des battements de plus en plus intenses, une majoration des efforts dynamiques dans l'ensemble de la structure, et peut aboutir à une désorganisation totale de l'appareil d'appuis, ou à une rupture des scellements dans la maçonnerie.

2-3-7 Organes d'attaches ou d'ancrage

Les organes d'attaches ou d'ancrage des câbles (tirants et étriers) de même que le dispositif anti-soulèvement dans le cas des ponts haubanés, se présentent, comme les parties haute et basse des suspentes en barres d'acier, sous la forme de ronds en acier mi-dur filetés à leurs extrémités et transmettent un effort de traction à l'aide d'un écrou bloqué sur une autre pièce (culot, potence, chevalet). Ces dispositions constructives d'une part, engendrent des concentrations de contrainte en fond de filets et, d'autre part, suivant la configuration propre à chaque ouvrage, peut favoriser les phénomènes de corrosion en ces mêmes points, l'ensemble pouvant conduire à une fissuration. Les aciers constitutifs de ces organes présentent, par ailleurs, une qualité très variable, notamment sur le plan de la résistance à la rupture fragile, il s'ensuit des risques de rupture de pièces pouvant entraîner des désordres sérieux et la ruine de l'ouvrage.

2-4 Surveillance

Les ponts suspendus font l'objet d'une surveillance particulière et les points suivants doivent être soumis à un examen attentif :

- massifs et chambres d'ancrage,
- pylônes dans leur ensemble et plus particulièrement selles d'appuis ou d'attache des câbles,
- câbles dans leur ensemble et plus particulièrement zones de rétention d'eau et ancrage,
- suspentes et plus particulièrement les attaches sur les câbles et sur les tabliers,
- tabliers, sous l'angle de leur déformation générale et localisée,
- appareils d'appui.

Il faut s'attacher à retrouver les causes et les conséquences possibles des dégâts constatés et garder présent à l'esprit, plus que dans n'importe quel autre type d'ouvrage :

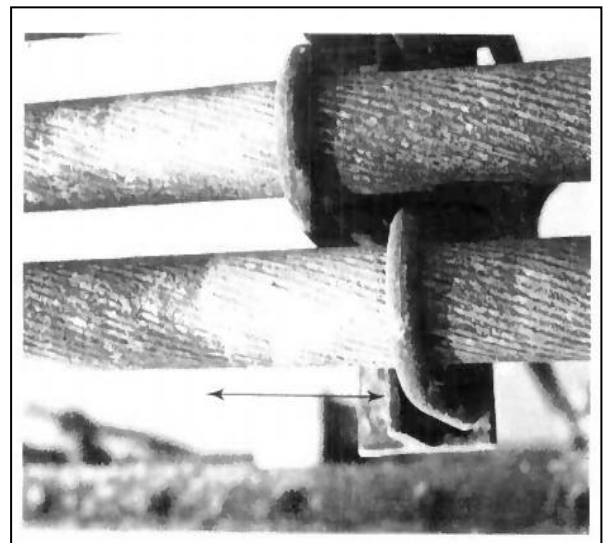
- un désordre local peut avoir une cause d'ordre général,
- réciproquement, un désordre local, même apparemment peu grave, peut avoir des conséquences sur la tenue générale de l'ouvrage.

La surveillance comporte essentiellement :

- l'examen de l'allure général du profil en long dont les irrégularités peuvent se révéler un dérèglement de la suspension,
- l'examen de la verticalité des suspentes dont l'inclinaison peut traduire un glissement des pièces d'attache correspondantes (fig. 2-12) ou un déplacement relatif entre câble porteur et tablier,
- L'écoute des appareils d'appui ; les bruit de choc au passage des charges étant révélateurs de battements, donc d'usure (fig. 2-13).



a) inclinaison d'une suspente



b) Glissement de pièce d'attache

Figure 2-12: Défauts de la suspension

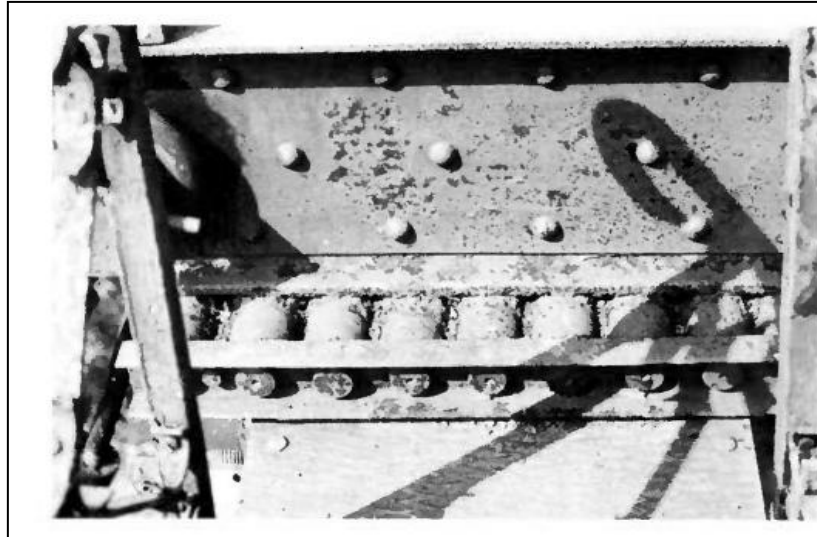


Figure 2-13 Blocage apparent du chariot d'une selle d'appui

2-5 Entretien

Les travaux d'entretien que nous allons passer en revue ci-après peuvent être subdivisés en deux parties à savoir les travaux liés à l'entretien courant et les travaux spécialisés.

2-5-1 Entretien courant

Les travaux d'entretien courant peuvent se résumer au nettoyage des selles d'appui mobiles des câbles et des articulations quand il en existe, ainsi que des abords des chambres et massifs d'ancrages qui doivent être régulièrement débarrassés de la végétation et des débris divers qui peuvent s'accumuler au voisinage des ancrages des câbles, retenant l'humidité et favorisant ainsi la corrosion.

2-5-2 Entretien spécialisé

Les opérations d'entretien spécialisées particulières concernent les parties d'ouvrage suivantes :

- massifs et chambres d'ancrage,
- suspension (câbles et suspentes),
- ancrage des câbles,
- selles d'appui mobiles.

2-5-2-1 Massifs et chambres d'ancrage

Chaque fois que cela est possible, il est nécessaire d'assurer l'aération des chambres d'ancrage, au besoin par établissement d'orifices de ventilation haute et basse.

2-5-2-2 Suspension

La suspension (câbles et suspentes) est justifiable de deux types d'opérations :

- Réfection périodique de la protection anti-corrosion où une attention particulière doit être apportée au choix des produits de protection qui doivent constituer un système homogène et être compatibles avec ceux préexistant sur les câbles.
- Réglage (fig. 2-14). Cette opération doit être envisagée lorsqu'il est constaté une inégalité de tension des suspentes ou une anomalie dans le profil en long de l'ouvrage ; par anomalie, il faut entendre, soit une irrégularité du profil en long, soit abaissement général du profil entraînant, le plus souvent, une cassure aux extrémités des tabliers. Notons que le réglage de suspension peut ne concerner que les suspentes, et le cas échéant, la remise en place des attaches supérieures ayant glissées le long des câbles porteurs. Plus rarement, le réglage peut concerner les câbles porteurs eux-mêmes avec égalisation des tensions.

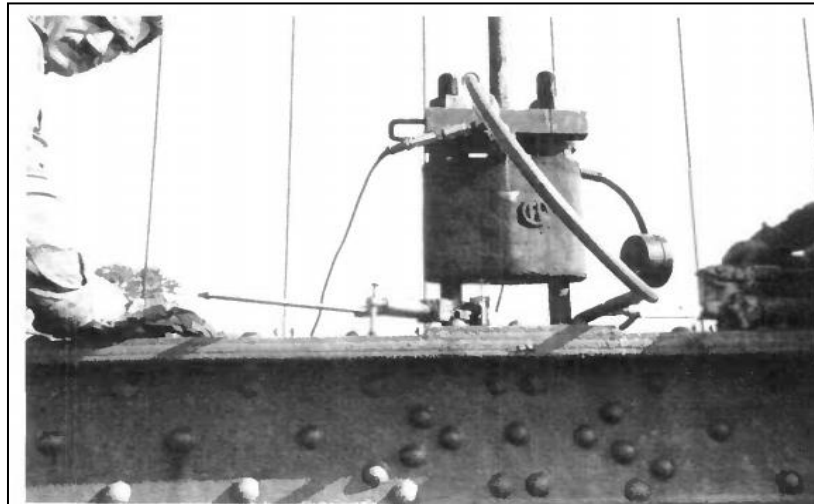


Figure 2-14 Réglage de la suspension

2-5-2-3 Ancrage des câbles

Les joints d'étanchéité à l'entrée des culots doivent être refaites périodiquement, à l'occasion de la réfection de la protection anti-corrosion, afin d'éviter toute infiltration d'eau. Les tirants d'ancrage doivent être protégés efficacement contre la corrosion.

2-5-2-4 Selles d'appui mobiles

Lorsque leur fonctionnement n'est pas satisfaisant, les selles d'appui mobiles doivent être soulevées, les surfaces de roulement doivent être vérifiées et nettoyées, de même que les rouleaux qu'il est d'ailleurs préférable de changer à l'occasion.

2-6 Réparation

Les ponts suspendus peuvent faire l'objet d'un certain nombre d'opérations que nous récapitulons ci-après. Certaines d'entre elles peuvent être décidées sans que l'ouvrage présente des dégradations particulières et appartiennent donc plutôt aux opérations d'entretien spécialisées.

Les opérations de réparation des ponts suspendus sont les suivantes :

- Comblement des chambres et galeries d'ancrage et mise à l'air libre des culots.
- Raccourcissement et reculottage des câbles.
- Changement total ou partiel de la suspension. Rénovation ou changement du tablier.
- Réfection des scellements ou changement total des appareils d'appui.
- Remise en état des pylônes qui demande assistance d'un bureau très spécialisé.

2-6-1 Comblement des chambres d'ancrage (fig. 2-15)

Dans les anciens ouvrages, lorsqu'il est impossible d'assurer une ventilation correcte des chambres, galeries ou puits d'ancrage, il est souhaitable de procéder au comblement, par bétonnage, de ceux-ci. Les culots d'ancrage des câbles sont alors reportés à l'air libre et la reprise de l'effort tranchant s'effectue par manchonnage, sur les anciens tirants, de barres de reprise noyées dans le béton.

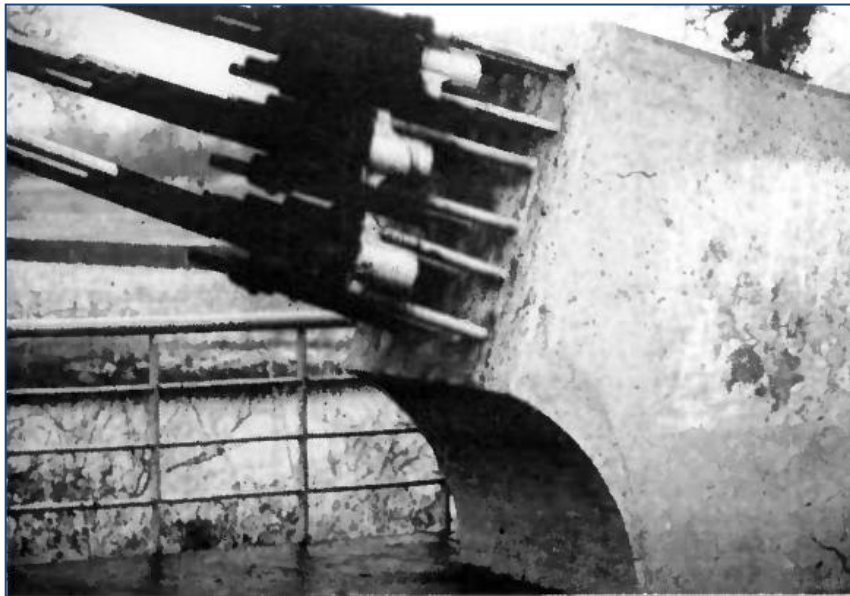


Figure 2-15 Comblement des chambres d'ancrage et remise à l'air libre des culots

2-6-2 Raccourcissement des câbles (fig.2-16)

L'opération de raccourcissement des câbles peut être aussi envisagée dans le cas de la corrosion prononcée ou de ruptures de fils au niveau des culots d'ancrage, même lorsque ceux-ci sont à l'air libre. On procède alors à un nouveau culottage sur le câble amputé de sa partie défectueuse ; il est indispensable au préalable, de s'assurer que le câble peut subir cette

nouvelle opération. Dans le cas contraire, le remplacement complet du câble doit être envisagé et l'opération relève du changement de suspension.

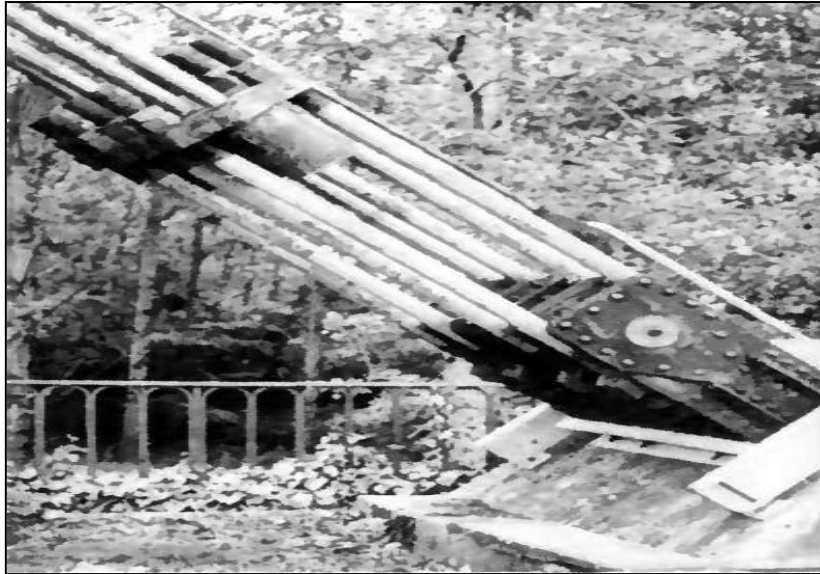


Figure 2-16 Raccourcissement des câbles

2-6-3 Changement de suspension (fig.2-17)

Le Changement de suspension d'un pont suspendu peut être partiel ou total ; il peut ne concerner que les suspentes, particulièrement lorsqu'elles sont constituées de câbles, ou concerner également un, plusieurs ou la totalité des câbles porteurs. Le changement partiel ou total de suspentes ne pose pas de difficultés particulières ; il est souhaitable, dans cette opération, de remplacer les suspentes en câbles par des suspentes en barre, avec une modification des systèmes d'attache. Cependant, le changement d'un ou plusieurs câbles est une opération très délicate qui présente certains dangers. Dans tous les cas (changement de suspentes ou de câbles), l'opération nécessite une étude effectuée par un service technique spécialisé, les matériaux utilisés et les différentes phases des travaux doivent être parfaitement définies, de même que la répartition des efforts au cours de ces différentes phases, notamment en cas d'utilisation d'une suspension provisoire et au cours du transfert de charges de l'ancienne suspension sur la nouvelle. Après mise en place et mise en tension, une vérification d'ensemble et un réglage de tous les éléments de la suspension doit être effectuée. De plus, en raison du phénomène de fluage, il est recommandé de mettre en œuvre des câbles ayant subit une pré-tension en usine.

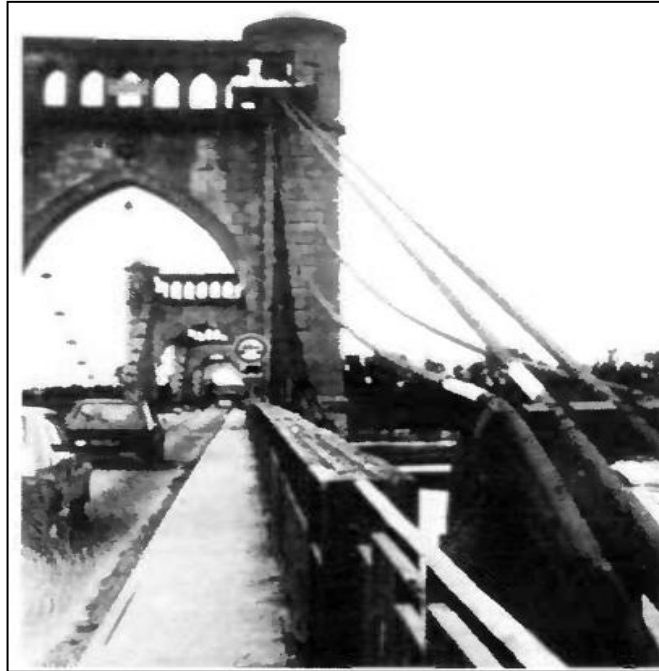


Figure 2-17 Changement de suspension

2-6-4 Opérations sur les appareils d'appuis

Les effets dynamiques du trafic, particulièrement sensibles sur les ponts suspendus, entraînant les désordres cités dans la section précédente, il peut être nécessaire de procéder à la réfection des scellements des appareils d'appuis. Dans ce cas, il ne faut pas hésiter à surdimensionner les nouveaux scellements et à revoir la conception et procéder au changement des appareils d'appuis, en tenant compte de l'agressivité du trafic actuel pour lequel les ouvrages anciens n'étant pas conçus.

CHAPITRE 3

PRINCIPES ET BASES DE CALCUL DES PONTS SUSPENDUS

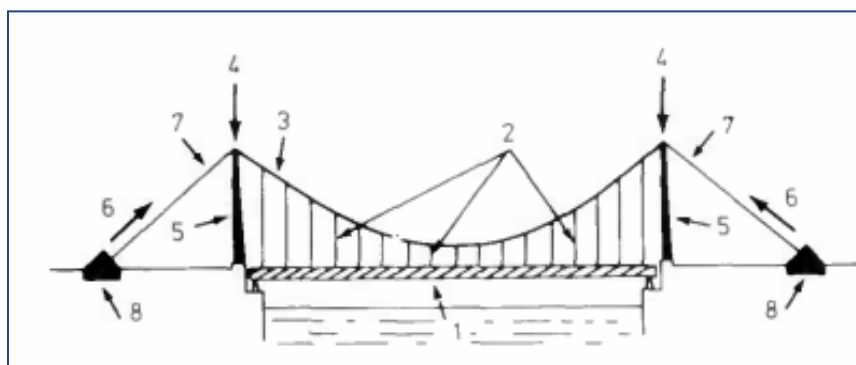
3-1 Généralités

Nous allons présenter dans ce chapitre les principes de base de calcul d'un pont suspendu dans le but de comprendre les fondements théoriques qui seront apportées au chapitre suivant permettant de décrire le comportement type d'un ouvrage suspendu précontraint mais dépourvu des poutres de rigidité. En premier lieu, nous passerons en revue le principe de fonctionnement d'un pont suspendu où les efforts développés peuvent se décomposer en une réaction verticale absorbée par les pylônes, et un effort de tension transmis par les câbles de retenue amarrés sur des massifs d'ancrage. En deuxième lieu, nous montrons comment formuler les équations fondamentales des ponts suspendus à poutre de rigidité conduisant à une équation non linéaire de la poussée dans les câbles dont la résolution fait appel à un processus itératif de type de Newton-Raphson. Nous terminons par la revue des différentes techniques de réglage de la suspension où un défaut quelconque de l'un de ses éléments peut conduire à des conséquences graves allant jusqu'à la ruine complète de l'ouvrage à cause de la stabilité du tablier qui s'en trouve directement affectée.

3-2 Principe de fonctionnement de l'ouvrage

Le principe de fonctionnement d'un pont suspendu comme montré sur la figure 3-1 peut être schématisé de la façon suivante :

- un tablier assure la continuité de la voie portée et la répartition de charges,
- des suspentes supportent le tablier et transmettent les efforts aux câbles,
- les câbles, de forme parabolique, assurent la fonction porteuse ; les efforts sont décomposés en une réaction verticale absorbée par les pylônes, et un effort de tension transmis par les câbles de retenue amarrés sur des massifs d'ancrage.



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

Figure 3-1 : Principe de fonctionnement d'un pont suspendu

Dans le cas général, les câbles de retenue, situés entre 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. 3-2). C'est selon ce schéma qu'ont été construits la plupart des ponts suspendus de moyenne portée ayant une seule travée dont le pont de Sidi M'Cid à Constantine (fig.2-1). Le passage des charges sur l'ouvrage, du fait de l'augmentation des efforts internes, 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) munis de galets de roulement permettant ces déplacements en réduisant au maximum les efforts horizontaux (fig.3-3). Dans un certain nombre d'autres cas, les pylônes, en acier ou en béton, sont articulés à leur base ; Les câbles sont alors solidarifiés aux pylônes et les déplacements sont rendus possibles par l'inclinaison de ces derniers. Enfin, dans le cas des pylônes souples dont la flexibilité est suffisante pour supporter sans dommage les déformations des câbles.

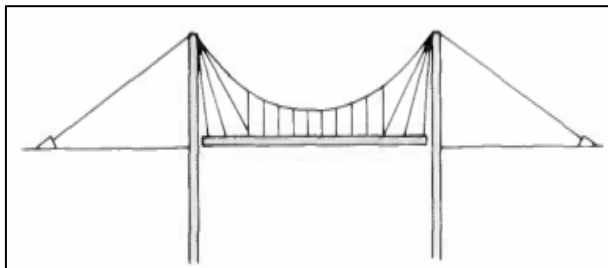


Figure 3-2 : Pont suspendu avec haubans inclinés

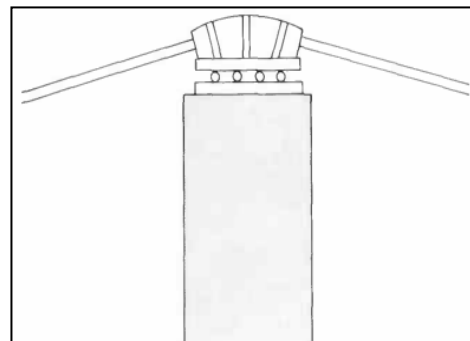


Figure 3-3 : Chariot mobile en tête de pylône

Lorsque les brèches à franchir sont importantes, il faut construire des ponts suspendus à travées multiples (fig. 3-4), où ces déplacements posent un problème particulier. En effet, si les câbles paraboliques reposent sur les pylônes par l'intermédiaire des 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 de chariot. Pour limiter ce phénomène, ces derniers seront liés entre eux par des câbles de tête (fig. 3-5).

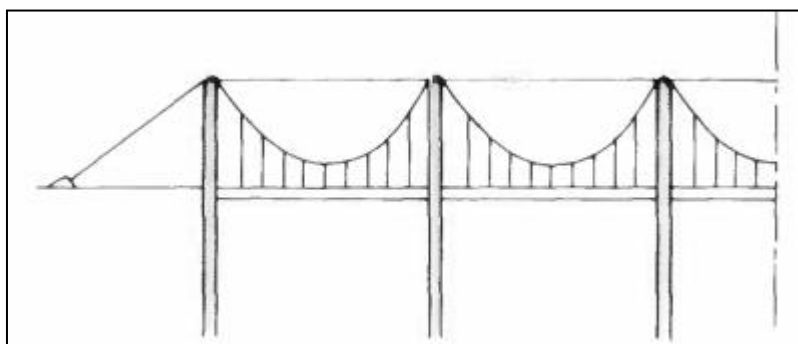


Figure 3-5 : Pont suspendu à câble de tête

Une autre grande famille de ponts suspendus mais la plus moderne est schématisé à la figure 3-6 dont l'ouvrage s'apparente au pont suspendu de Pierre Laporte sur le fleuve Saint Laurent à Québec (fig. 2-2). L'ouvrage comporte trois travées suspendues ; les travées de rive étant soit indépendantes, soit solidaires de la travée centrale. Les pylônes sont encastrés à leur base et les câbles sont reliés à la tête des pylônes, les déplacements étant possibles grâce à la flexibilité des pylônes.

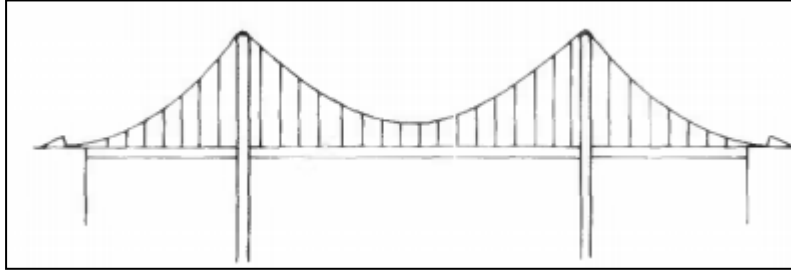


Figure 3-6 : Ouvrage à trois travées suspendues
(Pierre Laporte, Québec)

3-3 Calcul des ponts suspendus

Depuis 1823, date du premier mémoire de Navier sur les ponts suspendus [27] où sont posés les principes fondamentaux de la conception et du calcul de ces ouvrages, le calcul des ponts suspendus a donné lieu à de nombreuses études [1,28] qui ont conduit par la suite à la mise au point de méthodes très élaborées. Si ces méthodes étaient assurément complexes pour une utilisation manuelle, l'emploi aujourd'hui des codes de calcul permet une mise en œuvre rapide et économique pour déterminer les 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 pas un obstacle majeur. En réalité, les difficultés plutôt proviennent :

- de la détermination des données à introduire dans le calcul, à cause soit des caractéristiques géométriques des pièces qui peuvent être différentes de celles figurant dans le plan de construction, soit des caractéristiques mécaniques des matériaux notamment en ce qui concerne les câbles en prenant compte de certains facteurs tels que la corrosion,
- de la recherche des méthodes de calcul simplifiées, mais permettant de mieux cerner la sécurité en tenant compte d'un fonctionnement anormal éventuel de l'ouvrage ; par exemple, prise en compte d'un dérèglement de suspension susceptible de modifier les efforts dans les pièces essentielles de l'ouvrage.

3-3-1 Méthodes de calcul et hypothèses de base

Il existe actuellement deux grandes familles de méthodes employées pour le calcul des ponts suspendus à poutres de rigidité:

- Les méthodes numériques, par éléments finis, basés sur les éléments de barres à grands déplacements où le problème majeur réside dans la bonne schématisation de la configuration initiale de l'ouvrage ; à la température de réglage et en l'absence de

surcharge, mais sous l'action des charges permanentes, les poutres de rigidité ne doivent supporter théoriquement aucun effort.

- Les méthodes analytiques manuelles au deuxième degré basées sur les formules de résistance des matériaux dont la méthode de base rapportée dans le cours de Courbon [1] ou de Timoshenko [2], où la plupart des ponts suspendus ont été étudiés. Les calculs sont facilités par l'emploi d'abaques ou de mini-sous programmes sur ordinateur.

Bien entendu, les deux méthodes, analytique ou numérique, supposent un réglage correct de la suspension (solicitations nulles dans les poutres de rigidité sous charges permanentes) et le bon état des chariots des selles, lorsque celles-ci sont mobiles (frottements faibles).

Par ailleurs, les fondements théoriques de base de calcul des ponts suspendus avec massifs d'ancrage, que nous allons présenter dans la section qui suit, sont basés sur les hypothèses simplificatrices suivantes:

- les suspentes sont inextensibles et infiniment rapprochées ;
- les câbles n'exercent aucune réaction horizontale sur les pylônes qui peuvent être articulés, flexibles ou selles mobiles;
- les déformations à l'effort tranchant sont négligées ;
- les suspentes restent verticales ;
- la rigidité flexionnelle de la poutre de rigidité est constante.

Ces hypothèses conduisent généralement à des erreurs négligeables ou faibles où il est important de souligner que seul est considéré ici, le calcul des ouvrages sous charges verticales et sans câble de tête; il conviendra par ailleurs de s'assurer que le tablier transmet correctement aux appareils d'appuis les efforts horizontaux dus au vent.

3-3-2 Equations fondamentales des ponts suspendus à poutres de rigidité

Les ponts suspendus à poutres de rigidité sont des ouvrages dans lesquels les câbles porteurs sont attachés à leurs extrémités sur des massifs d'ancrage pouvant comporter plusieurs travées. Les poutres de rigidité de chaque travée sont suspendues aux câbles et reposent simplement à leurs extrémités. En l'absence de surcharges, et à la température moyenne, le réglage de l'ouvrage est tel que les poutres de rigidité sont supposées reprendre aucun effort. Les câbles sont en outre appuyés sans frottement possible sur les pylônes par l'intermédiaire des chariots de dilatation de façon à exercer aucune réaction horizontale sur les pylônes.

En l'absence de surcharges et à la température moyenne, la composante horizontale H de la traction du câble, que par analogie avec les arcs on appelle poussée, est due à la seule charge permanente, et est constante d'une extrémité à l'autre du câble. Lorsque les poutres de rigidité sont surchargées, ou lorsque la température est différente de la moyenne, la poussée devient $H+h$. Nous allons tout d'abord montrer que lorsque l'on connaît H , on peut calculer les moments fléchissants M et les efforts tranchants T dans la poutre, de façon simple. Tout le problème du pont suspendu revient alors à la détermination de l'inconnue h .

3-3-2-1 Principes généraux

A- Expressions générales de la déformée, du moment fléchissant et de l'effort tranchant dans une travée

Soit H la poussée due à la charge permanente de densité w , en l'absence de surcharges et à la température moyenne. Le câble décrit alors une parabole de flèche f , soit l'équation rapportée à sa corde OA (fig. 3-7) est :

$$y = \frac{4f}{l^2} x(l-x) \quad (3-1)$$

l étant la portée de la travée considérée. En effet, en désignant par μ' le moment fléchissant produit par la charge permanente d'intensité w dans la poutre droite sur appuis simples de portée l (fig. 3-7b), la figure d'équilibre du câble s'obtient en écrivant que le moment en tout point du câble est nul, soit :

$$-\frac{wl}{2}x + \frac{wx^2}{2} + H(y + x \tan \theta) - Hx \tan \theta = 0 \quad (a)$$

car la réaction d'appui du câble sur le pylône OO' de résultante Q (force de traction agissant dans le câble au point O') comprend, outre la réaction de la poutre sur appuis simples $R=wl/2$ (fig. 3-7b), une réaction dirigée suivant la corde OA de composante horizontale H et verticale $R=H \tan \theta$. L'équation précédente en sachant que :

$$\mu'(x) = \frac{wx^2}{2} x(l-x) \quad (b)$$

se réduit à :

$$\mu' - Hy = 0 \quad (3-2)$$

Il en résulte que :

$$y = \frac{\mu'}{H} = \frac{w}{2H} x(l-x) \quad (c)$$

Par comparaison avec (3-1), on voit que :

$$H = \frac{wl^2}{8f} \quad \text{ou} \quad \frac{w}{H} = \frac{8f}{l^2} \quad (3-3)$$

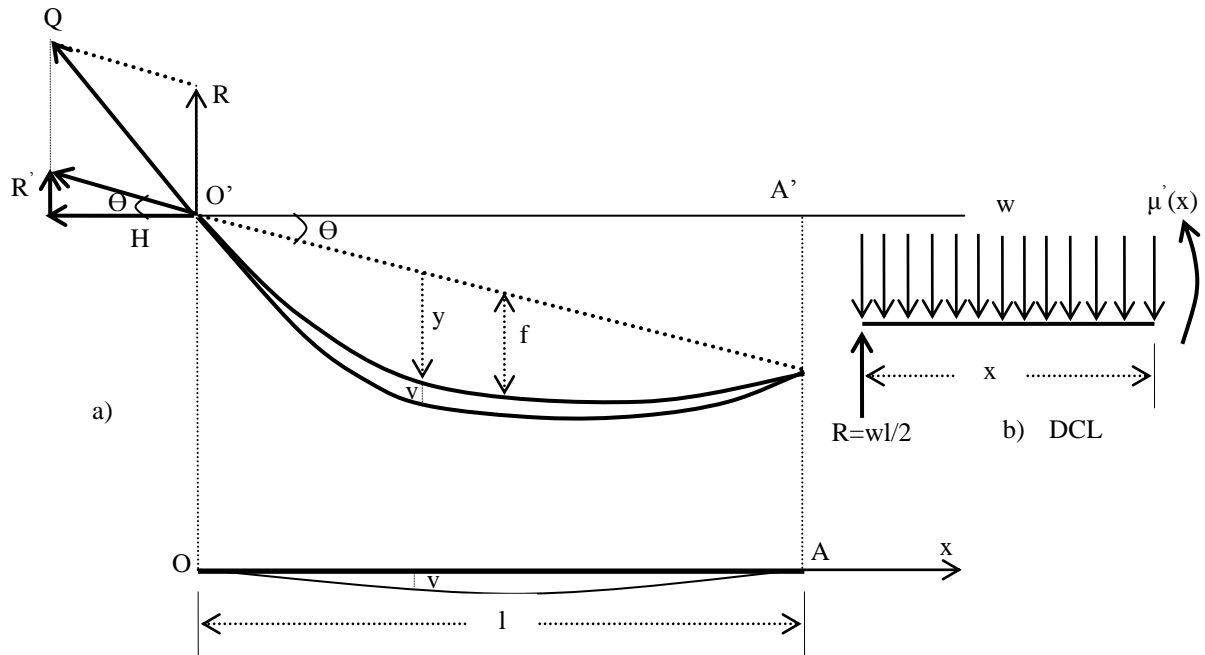


Figure 3-7 : Equilibre du câble

Supposons maintenant que la température vient à varier ou que des surcharges, pouvant comprendre des charges concentrées ou des charges réparties de densités constantes réparties sur toute ou partie de la travée, sont appliquées à la poutre de rigidité. Désignons par μ le moment fléchissant dû à ces surcharges dans la poutre droite sur appuis simples de portée l , et par v le moment fléchissant qui se produirait dans cette même poutre droite sous l'action de la partie des surcharges transmises au câble par les suspentes. La poussée devient $H+h$ et le câble prend une nouvelle figure d'équilibre $y+v$, analogue à l'équation (3-2) :

$$\mu' + v - (H + h)(y + v) = 0 \quad (d)$$

Eliminons μ' entre cette équation et l'équation (3-2), il vient :

$$v = (H + h)v + hy \quad (e)$$

Il en résulte que le moment fléchissant M dans la poutre de rigidité est :

$$M = \mu - v = \mu - (H + h)v - hy \quad (3-4)$$

Si l'on néglige l'allongement des suspentes, la déformée de la poutre est égale à celle du câble. On a donc d'après l'équation de la ligne élastique, puisque v est compté positivement vers le bas :

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (f)$$

I étant le moment d'inertie supposé constant de la poutre de rigidité et E le module d'élasticité du matériau utilisé de cette poutre. Si le moment d'inertie de la poutre n'est pas constant, on

prendrait pour I le moment d'inertie moyen. En tenant compte de l'équation (3-4) et en posant :

$$K^2 = \frac{H+h}{EI} \quad (3-5)$$

On parvient ainsi à l'équation différentielle :

$$\frac{d^2v}{dx^2} - K^2v = -\frac{K^2}{H+h}(\mu - hy) \quad (3-6)$$

Dans les conditions de surcharges définies précédemment, on peut partager la portée l de la poutre en un certain nombre d'intervalles partiels à l'intérieur de chacun desquels le second membre de l'équation (3-6) reste continu ; les limites des intervalles sont donc, outre les extrémités de la travée, les points d'application des surcharges concentrées et les extrémités des zones de surcharges réparties d'intensité constante. A l'intérieur de chacun de ces intervalles, le second membre de l'équation (3-6) est un polynôme de second degré, et son intégrale peut s'écrire sous la forme :

$$v = \frac{h}{H+h} \left[\frac{A}{K^2} e^{Kx} + \frac{B}{K^2} e^{-Kx} + \frac{\mu}{h} - y + \frac{1}{K^2} \left(\frac{w}{H} - \frac{p}{h} \right) \right] \quad (3-7)$$

où p désigne l'intensité de la surcharge répartie dans l'intervalle considérée, et A et B deux constantes. Il y a autant de couples de constantes que d'intervalles et on les détermine en écrivant que v est nul en x=0 et x=l, et que v et dv/dx sont continues aux limites communes à 2 intervalles. On se rend compte qu'on obtient bien ainsi autant d'équations qu'il y a de constantes à calculer. Concernant v, l'équation (3-4) donne M :

$$M = \frac{-h}{K^2} \left[\frac{A}{K^2} e^{Kx} + \frac{B}{K^2} e^{-Kx} + \frac{w}{H} - \frac{p}{h} \right] \quad (3-8)$$

L'effort tranchant T dans la poutre de rigidité est alors :

$$T = \frac{dM}{dx} = \frac{-h}{K^2} \left[\frac{A}{K^2} e^{Kx} - \frac{B}{K^2} e^{-Kx} \right] \quad (3-9)$$

B- Equations de base servant au calcul de la poussée

C'est l'équation qui donne le déplacement horizontal u_1 du câble à l'extrémité de la travée, connaissant le déplacement horizontal u_0 à l'origine, la déformation v du câble, la variation de poussée h, et la variation linéaire due à la température. Nous supposons les déplacements du câble infiniment petits. Soient x, y, s les coordonnées rectangulaires et l'abscisse curviligne d'un point du câble dans l'état initial (charge permanente seule et température moyenne). On a dans un système d'axes supposé rectangulaire :

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \quad (g)$$

Soient $x + u = x + \delta x$, $y + v = y + \delta y$, $s + \delta s$, les mêmes éléments dans le nouvel état d'équilibre en présence de surcharges et à la nouvelle température. On déduit de l'équation précédente en négligeant les termes de second ordre:

$$ds \delta ds = dx \delta dx + dy \delta dy \quad (h)$$

ou :

$$ds \delta ds = dx du + dy dv \quad (i)$$

car on a :

$$\delta dx = d\delta x = du, \delta dy = d\delta y = dv \quad (j)$$

Il en résulte que :

$$\frac{du}{dx} = \frac{ds}{dx} \frac{\delta ds}{dx} - \frac{dy}{dx} \frac{dv}{dx} \quad (3-10)$$

Cherchons à évaluer δds , qui comprend :

- un allongement élastique dû à l'accroissement h de la poussée :

$$\delta_1 ds = \frac{h}{ES} \left(\frac{ds}{dx} \right) ds \quad (k)$$

E et S désignant respectivement le module d'élasticité et la section du câble.

- une variation de la longueur due à la température :

$$\delta_2 ds = \tau ds \quad (l)$$

τ étant la variation linéique due à la température, donc:

$$\delta ds = \frac{h}{ES} \left(\frac{ds}{dx} \right) ds + \tau ds \quad (m)$$

La formule (3-9) devient alors :

$$\frac{du}{dx} = \frac{h}{ES} \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 + \tau \left(\frac{ds}{dx} \right)^2 - \frac{dy}{dx} \frac{dv}{dx} \quad (3-11)$$

Intégrons cette équation d'une extrémité à l'autre de la travée, nous obtenons :

$$u_1 - u_0 = - \int_0^L \frac{dy}{dx} \frac{dv}{dx} dx + \frac{h}{ES} L_s + \tau L_t \quad (3-12)$$

Les coefficients de longueur L_s et L_t (voir annexe A) étant définis par :

$$L_s = \int_0^L \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 dx, \quad L_t = \int_0^L \left(\frac{ds}{dx} \right)^2 dx \quad (3-13)$$

En intégrant par parties l'intégrale figurant dans (3-12), en remarquant que :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{-8f}{l^2} \quad (n)$$

on peut mettre cette équation sous l'une ou l'autre des deux formes suivantes

$$u_1 - u_0 = \int_0^L v \frac{d^2 y}{dx^2} dx + \frac{h}{ES} L_s + \tau L_t \quad (3-14)$$

$$u_1 - u_0 = \frac{-8f}{l^2} \int_0^L v dx + \frac{h}{ES} L_s + \tau L_t \quad (3-15)$$

Si l'on connaît u_0 et u_1 , l'équation (3-15) dans laquelle v est remplacé par son expression générale (3-7) donne la poussée h .

3-3-2-2 Formulation de l'équation de la poussée

Considérons un pont suspendu à n travées ; nous affecterons de l'indice (i) les quantités : $l, f, y, v, \omega, I, L_s, L_t, \mu, M, T$ considérées précédemment afférentes à la travée (i) . L'équilibre à l'état initial correspond à une poussée H telle que :

$$H = \frac{w_i l_i^2}{8f_i} \quad \text{ou} \quad \frac{w_i}{H} = \frac{8f_i}{l_i^2} \quad (3-16)$$

Lorsque les travées sont surchargées, ou si la température est différente de la température de réglage, la poussée devient $H+h$; si u_i est le déplacement horizontal au droit du pylone P_i (fig. 3-8), l'équation fondamentale (3-15) donne pour chaque travée :

$$u_i - u_{i-1} = \frac{-8f_i}{l_i^2} \int_0^{l_i} v_i dx + \frac{h}{ES} L_{s_i} + \tau L_{t_i} \quad (3-17)$$

Les déplacements du câble au droit des pylônes d'extrémité u_0 et u_n sont dus aux variations de longueur des câbles d'ancrage ; si ces derniers ont une tension initiale suffisamment forte, ou s'ils sont suffisamment courts, on peut négliger leurs déformations verticales, et écrire, $L_{s0}, L_{t0}, L_{s,n+1}, L_{t,n+1}$ étant les quantités L_s et L_t relatives aux câbles d'ancrage :

$$\begin{cases} u_0 = \frac{h}{ES} L_{s0} + \tau L_{t0} \\ -u_n = \frac{h}{ES} L_{s,n+1} + \tau L_{t,n+1} \end{cases} \quad (3-18)$$

On élimine les déplacements u_i en ajoutant membre à membre les équations (3-17) et (3-18) ; on obtient :

$$\frac{h}{ES} L_s + \tau L_t = \sum_{i=1}^n \frac{8f_i}{l_i^2} \int_0^{l_i} v_i dx \quad (3-19)$$

après avoir posé, les intégrales étant calculées d'une extrémité à l'autre du câble :

$$\mathfrak{S}_s = \sum L_s = \int_0 \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 dx, \quad \mathfrak{S}_t = \sum L_t = \int_0 \left(\frac{ds}{dx} \right)^2 dx. \quad (o)$$

mais on a :

$$v_i = \frac{h}{H+h} \left[\frac{1}{K_i^2} (A_i e^{K_i x} + B_i e^{-K_i x}) + \frac{\mu_i}{h} - y_i + \frac{1}{K_i^2} \left(\frac{w_i}{H} - \frac{p_i}{h} \right) \right] \quad (p)$$

K_i étant défini par :

$$K_i^2 = \frac{H+h}{EI_i} \quad (3-20)$$

Il y a bien entendu, autant de couples de constantes (A_i, B_i) que d'intervalles de surcharges à considérer dans la travée (i). On déduit de l'expression de v_i :

$$\int_0^{l_i} v_i dx = \frac{h}{H+h} \frac{D_i}{K_i^2} + \frac{C_i}{H+h} + \frac{h}{H+h} \left[\frac{8f_i}{l_i K_i^2} - \frac{2}{3} l_i f_i \right] \quad (3-21)$$

avec :

$$\begin{cases} C_i = \int_0^{l_i} \left(\mu_i - \frac{p_i}{K_i} \right) dx \\ D_i = - \int_0^{l_i} (A e^{K_i x} + B e^{-K_i x}) dx \end{cases} \quad (3-22)$$

En portant l'expression (3-21) dans (3-19), on obtient l'équation donnant la poussée, qu'on peut écrire sous la forme :

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{8f_i}{l_i^2} C_i - \tau(H+h)\mathfrak{S}_t}{\sum_{i=1}^n \frac{8f_i}{l_i^2} \left(\frac{2}{3} l_i f_i - \frac{8f_i}{l_i K_i^2} + \frac{D_i}{K_i^2} \right) + \frac{H+h}{ES} \mathfrak{S}_s} \quad (3-23)$$

Cette équation contient la poussée h au second membre, car les (A_i, B_i) et les K_i dépendent de h . On pourrait sous cette forme, la résoudre par itération, la substitution d'une valeur approchée de h dans le second membre fournissant une nouvelle valeur de h plus approchée que la précédente. Mais ce calcul est généralement plus long, car il faudrait à chaque approximation, calculer toutes constantes (A_i, B_i) , puis D_i .

Il est possible de donner à l'équation de la poussée une nouvelle forme plus intéressante que la précédente, et donner lieu à des approximations plus rapidement convergentes en calculant explicitement les constantes (A_i, B_i) , puis C_i et D_i en considérant un certain nombre de cas de surcharges. En portant ainsi les valeurs obtenues dans l'équation (3-23), nous pourrions parvenir à la nouvelle forme de l'équation de la poussée plus facilement utilisable. Cet aspect sera traité en détail dans le chapitre suivant pour l'analyse d'un système vertical précontraint qui est analogue à un pont suspendu mais dépourvu de la rigidité des poutres.

3-4 Réglage de la suspension

Un pont suspendu étant défini par ses caractéristiques géométriques (profil en long du tablier, distance et hauteur des pylônes, flèche des câbles porteurs), les vérifications doivent se faire en respectant les hypothèses de calcul énumérées dans la section 3-3-1 dont particulièrement :

- les tensions sont égales dans les suspentes et dans chaque câble élémentaire constitutif des faisceaux ou des nappes;
- les poutres de rigidité ne reprennent aucune sollicitation ($M=T=0$) pour une température de réglage de référence (20°C) ;
- la composante horizontale de la tension dans les câbles est supposée constante d'un bout à l'autre du câble ; cela implique que les câbles se déplacent librement dans un plan horizontal au sommet des pylônes par le biais des chariots de dilatation ;

Sur ces bases, le calcul permet de préciser la longueur et le tracé des câbles entre les ancrages, la longueur de chaque suspente ainsi que les tensions sous charges permanentes 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 tel que défini au départ. Il en est tout autrement compte tenu d'un certain nombre de facteurs comme l'incertitude du module d'élasticité réel des câbles et le fait que toutes les opérations ne sont pas 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.

3-4-1 Réglage d'un ouvrage en construction

3-4-1-1 Etapes par ordre chronologique :

Les étapes successives sont les suivantes :

- Pose des câbles porteurs et réglage de leur longueur pour mise à la flèche théorique sous poids propre de chaque câble.
- Mise en nappe ou en faisceau des câbles avec pose des colliers.
- Mise en place des suspentes et construction du tablier suivant un processus bien établi lors du calcul.

Vu que les processus d'usinage et de montage ne permettent pas de réaliser rigoureusement ce qui est prévu dans les calculs, il est nécessaire de procéder à un réglage complémentaire :

- un premier réglage général de la longueur des suspentes permettant d'obtenir le profil en long du tablier où le contrôle se fait par visées optiques ;
- le réglage par vérinage des câbles élémentaires de retenue de manière à égaliser les tensions ;
- un réglage fin qui nécessite à contrôler la tension de chaque suspente par vérinage.

3-4-1-2 Moyens de mesure

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

- les mesures de longueur (longueur du câble ou des suspentes, flèche de la parabole des câbles) ;
- les mesures de force par vérinage comme les tensions dans les suspentes par exemple.

3-4-1-3 Réglage des câbles

Le réglage des câbles porteurs est sans aucun doute la plus délicate opération rencontrée dans le réglage d'un pont suspendu à cause des inégalités de tension entre les câbles si ceux-ci sont particulièrement à l'état neuf. Ces écarts de tension peuvent être réduits sensiblement si les câbles sont livrés de l'usine après avoir subi une mise en tension préalable jusqu'au voisinage de la charge de service. Le réglage est généralement par vérinage des ancrages tout en évitant des surtensions dans la partie des câbles de retenue situés entre le collier d'épanouissement et l'ancrage qui constitue une zone très exposée à la corrosion, donc à la corrosion fissurante sous tension. D'une manière générale, il y a intérêt à rechercher les dispositions constructives qui permettent de diminuer les inégalités de tension entre les câbles : par exemple, les colliers et les selles permettent de libérer un câble donc de modifier sa tension sans libérer les autres, les attaches des suspentes jouent un rôle de palonnier pour égaliser les tensions entre deux groupes de câbles.

3-4-1-4 Réglage des suspentes

Le réglage des suspentes s'effectue en deux temps où dans le premier, on mesure la longueur des suspentes et leur verticalité de manière à obtenir un tracé de câble et un profil en long aussi proche que possible du dessin théorique. Dans un deuxième temps, on procède 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.

3-4-1-5 Evolution 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. Les causes possibles d'un dérèglement sont les suivantes :

- variation du module d'élasticité des câbles porteurs qui dépend du nombre de cycles de chargement (surtout au jeune âge) et du temps, par suite du fluage des câbles et du serrage progressif de leurs fils constitutifs ;
- glissements accidentels des colliers ou aussi des câbles dans les culots d'ancrages ;
- mouvement au niveau des pylônes ou des massifs d'ancrage ;
- blocage des selles mobiles.

Les risques d'un dérèglement sont en général graves puisque la stabilité du tablier peut en être affectée soit par rupture du câble ou de suspente dont le processus peut se propager de proche en proche. Par ailleurs, un ouvrage mal réglé donne lieu à un comportement dynamique

anormal qui se traduit par des battements au niveau des appareils d'appuis. Ces chocs répétés détériorent progressivement les appuis eux-mêmes, les joints de chaussée, le revêtement, la chappe d'étanchéité...

3-4-2 Réglage d'un ouvrage en service

3-4-2-1 Symptômes de dérèglement de la suspension

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

- le repérage des suspentes molles souvent par simple examen s'il n'y a pas une quelconque suspente détendue ;
- le nivellement du tablier et des câbles qui permettent de se faire une idée du réglage d'ensemble ;
- l'examen des culots permet de détecter des glissements du métal fusible (fig. 3-8) ;
- la détection du blocage des dispositifs de roulement des selles d'appuis mobiles en tête des pylônes ;
- l'examen des appareils d'appui ou souvent une défection est synonyme de la conséquence d'une suspension dérèglée.

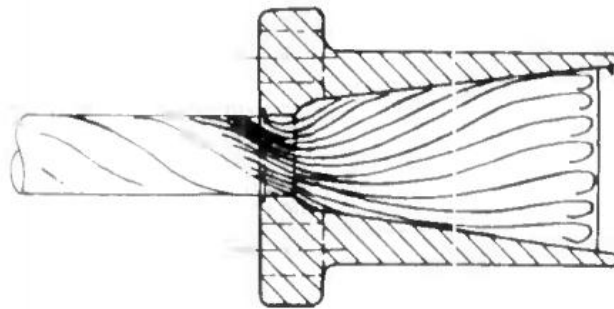


Figure 3-8 : Glissement du métal fusible dans le culot

3-4-2-2 Opérations de réglage

Les différentes opérations de réglage sont les suivantes :

- nettoyage et déblocage le cas échéant, ou éventuellement remplacement des dispositifs de roulement des selles en tête de pylônes ;
- vérification des tensions dans les câbles de retenue ;
- démontage partiel ou total des appareils d'appui ;
- vérification de la tension et réglage des haubans, des câbles de tête et des câbles paraboliques ;
- 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, suivi du réglage des haubans et des câbles de tête ainsi que des câbles de retenue ou éventuellement des câbles paraboliques ;
- réglage des appareils d'appui ou mise en place de nouveaux appareils selon le cas.

CHAPITRE 5

EXPERIMENTATIONS NUMERIQUES ET ANALYSES

5-1 Généralités

Dans le cadre de ce chapitre, nous allons illustrer le programme de la méthode ainsi établie par des applications numériques portant sur l'analyse d'un ouvrage type de pont suspendu léger et sans poutre de rigidité soumis à l'action de charges verticales appliquées dans le plan général du système. Le programme s'intitule BPCVER (**B**loc **P**incipal de l'analyse sous **C**harges **V**erticales), écrit en langage d'ordinateur APL et facilement exploitable sur micro-ordinateurs. Soulignons que la méthode de calcul et le programme de calcul ont été développés par mon directeur de mémoire au cours de ses travaux antérieurs [30] et auxquels sont apportés dans ce travail quelques modifications notamment en liaison avec l'analyse paramétrique en vue de la représentation graphique des résultats.

5-2 Description du programme BPCVER

Dans cette section, nous allons d'abord présenter la description des données qui se font d'une manière interactive i.e directement sur écran et ensuite donner l'organigramme général du programme résumant la méthode de calcul utilisée.

5-2-1 Entrée des données

L'entrée interactive des données, l'ordinateur en répond sur écran par le symbole quad, ($\square \leftarrow$) s'effectue dans l'ordre ci-après.

5-2-1-1 Niveau et type d'analyse souhaités

- RN : niveau désiré des calculs (=0 : rappel des données d'entrée et impression des résultats avec certains détails intermédiaires ; =1 : rappel seulement des données et impression des principaux résultats) ;
- IR : type d'analyse à effectuer (=0 : analyse ordinaire ; =1 : analyse paramétrique).

5-2-1-2 Caractéristiques géométrique et mécanique de la structure

Si IR = 1, par appel de la fonction CARGEO :

- MCOOR (I,J) : coordonnées selon X et Y des différents points géométriques caractéristiques du câble principal (I=1,4 ; J=1,2) ;
- MPGCAB(I,J) : flèche à mi-travée et sections des câbles porteurs, haubans compris (I=1,3 ; J=1,2) ; la flèche du câble porteur étant stockée dans la variable F0.
- F1 et S1 : flèche à mi-travée et section du câble de rigidité.
- EC et W0 : Module d'élasticité des câbles et le poids propre total de l'ouvrage/ml.

Si $IR = 0$ par appel à la fonction RCARGEO, les données sont introduites de la même façon que précédemment ($IR=1$) mais où les coordonnées des points géométriques des câbles supérieurs ainsi que les flèches des câbles porteur ($F0$) et de rigidité ($F1$) doivent être spécifiées en terme de rapport de la longueur (L) de la travée médiane ; soit :

$$MCOOR \leftarrow MCOOR/L ; MPGCAB[;1] \leftarrow MPGCAB[;1]/L ; F1 \leftarrow F1/L.$$

En ce qui concerne les sections des câbles et le poids propre total de l'ouvrage, ceux-ci doivent être entrés en termes de pourcentage de la précontrainte initiale du câble de rigidité ($H1$) ; soit :

$$MPGCAB[;2] \leftarrow MPGCAB[;2]*EC/H1 ; ES \leftarrow S1*EC \leftarrow /H1 ; RW \leftarrow W0*L/H1.$$

5-2-1-3 Chargement

Si ($IR=0$) par appel à la fonction CHARGE0, il faut spécifier:

- charges uniformes :

MCUNIF[I;J] : intensité p_j et positions α_1^J, α_2^J ; $I=1,M, J=1,3$ où M est le nombre de surcharges uniformes appliquées sur le tablier.

- charges concentrées :

MCCONC[I;J] : intensité P_j et positions α_j ; $I=1,N, J=1,2$ où N est le nombre de surcharges concentrées appliquées sur le tablier.

Si ($IR=1$) par appel à la fonction CHARGE1, les charges doivent être entrées en terme de pourcentage de la précontrainte initiale du câble de rigidité ($H1$) ; soit :

- charges uniformes :

MCUNIF[I;J] : intensité $p_j \leftarrow p_j *L/H1$; positions $\alpha_1^J \leftarrow \alpha_1^J/L, \alpha_2^J \leftarrow \alpha_2^J/L$

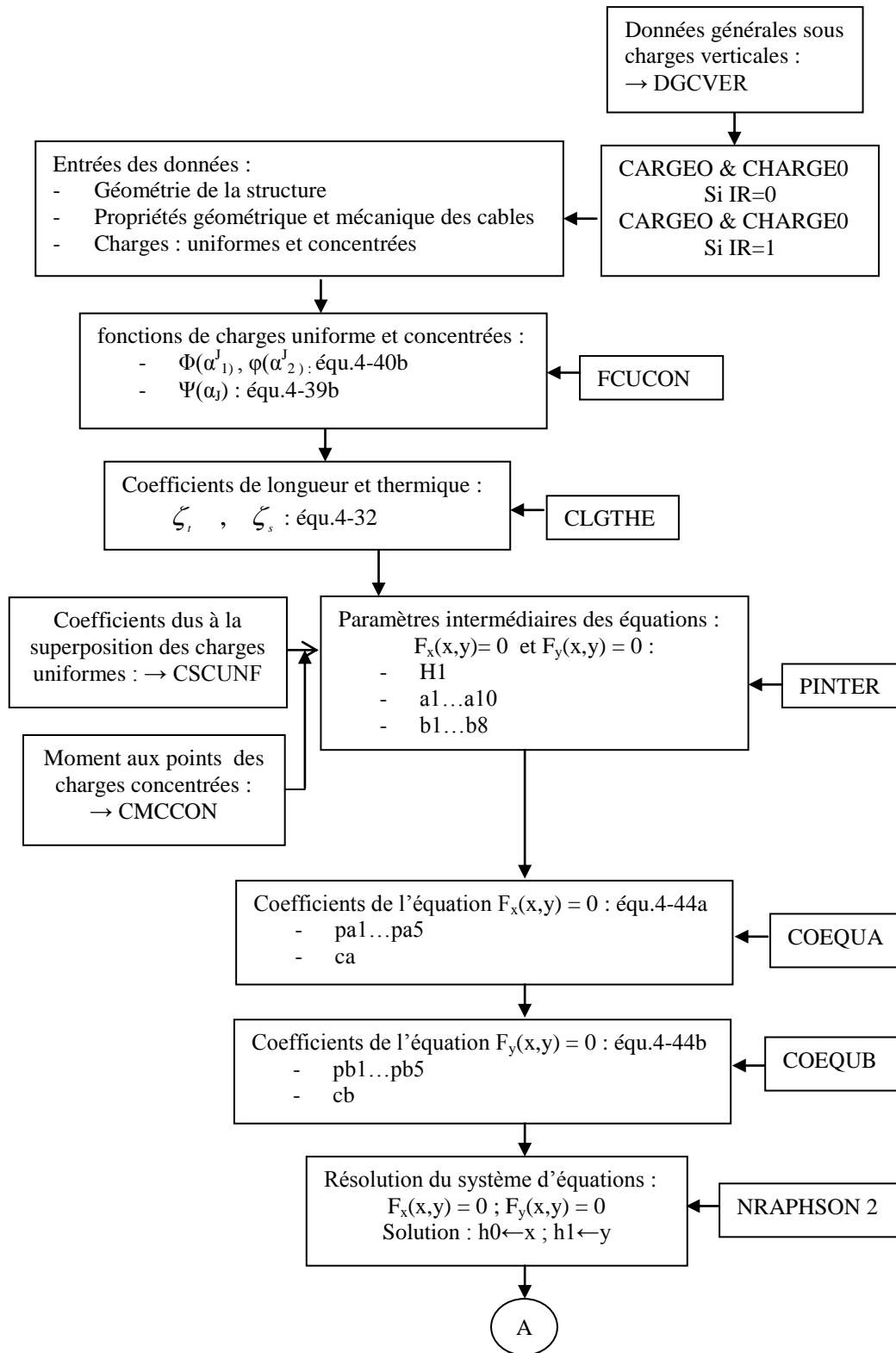
- charges concentrées :

MCCONC[I;J] : intensité $P_j \leftarrow P_j/H1$; positions $\alpha_j \leftarrow \alpha_j/L$.

5-2-1-3 Précontrainte initiale

Si $IR=0$, il faut spécifier la valeur de la précontrainte initiale du cable de rigidité ($H1$). Dans le cas contraire, on prend par défaut $H1=1$. Le programme nous indiquera par ailleurs le nombre de points de calcul désirés (N).

5-2-2 Organigramme général de calcul et principales fonctions associées



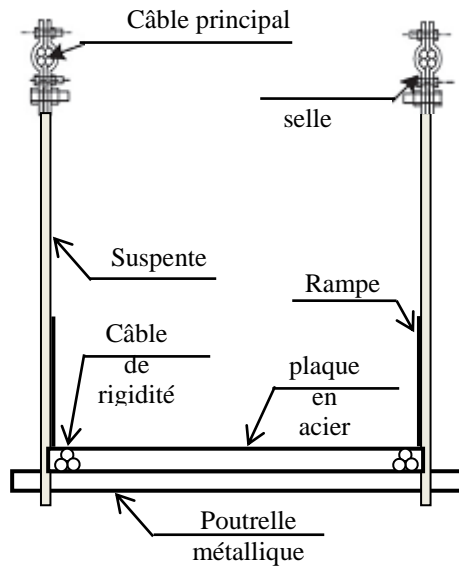


Figure 5-3 : Vue en profil de la structure suspendue

5-3-1 Description de la structure

Les dispositions générales adoptées sont décrites ci-après. Les différents éléments de la suspension sont supposés faits d'un matériau élastique hookien ayant un module d'élasticité $E_C = 1.10 \times 10^5$ MPa et une résistance à la traction $f_y = 1570$ MPa.

- Travée : la travée unique franchie est de $L = 120$ m centre à centre des pylônes ; les dimensions des haubans de rive sont négligeables mais pour des fins de l'utilisation des relations 4-36, nous prenons : $L'_1 = L'_2 = 0.001$ m ; $D^* = 10^{-5}$ m.
- Câbles porteurs : chacune des deux nappes de suspendes supposées d'un diamètre de 10 mm, est portée par un câble toronné de 50 mm de diamètre ($S_0 = 2000$ mm²), en fils d'acier étiré à haute résistance. Chaque câble est réglé sur une forme parabolique dans un plan vertical, passe au sommet des pylônes auquel il aboutit, et est finalement prolongé sur les rives comme hauban mais dont les dimensions sont supposées dans cet exemple négligeables.
- Câbles de rigidité : d'un diamètre de 56 mm ($S_2 = 2500$ mm²), ils sont au nombre de deux et disposés de chaque côté de l'ouvrage, à l'aplomb de la suspension. Les extrémités des câbles sont encastrées aux pieds des pylônes, dans les massifs de fondation de ces derniers.
- Tablier : le tablier est supposé composé de poutrelles métalliques simples reposant sur les platines des suspendes, entretoisées par des pièces légères. La pente du tablier est de 5 % signifiant un rapport flèche/travée du câble de rigidité égal à 1/40 soit une flèche $f_1 = 3$ m. En outre, la surcharge d'exploitation de l'ouvrage est de 2.5 kN/m² soit compte tenu de la largeur de l'ouvrage ($e = 2$ m), l'intensité de charges réparties p s'élève à 2.5 kN/m.
- Précontraintes initiales dans les éléments de la suspension : La traction de la précontrainte initiale du câble de rigidité H_1 est estimée par l'intermédiaire de la densité de réaction

donnée par la relation : $\omega_1 = \frac{64E_c S_1 f_1^3}{16f_1^2 l^2 + 3l^4} = 0.76 \text{ kN/m}$; soit à partir de la relation (4-7), nous

trouvons $H_1 = 456 \text{ kN}$. Par ailleurs, compte tenu de la géométrie de la structure, le poids propre de l'ouvrage ainsi sommairement décrit s'élève à 3.6 kN par mètre horizontal. Chaque câble parabolique principal supportera alors 1.8 kN/m ($=\omega_0$) avant l'introduction de toute surcharge. A titre d'exemple, sous l'effet de cette charge permanente et du réglage initial et avec une flèche f_0 du câble porteur prise égale à 6m soit $f_0/L=1/20$, la relation (4-9) donne pour la précontrainte initiale H_0 une valeur de 768 kN . En ce qui concerne les suspentes supposées écartées d'une manière équidistantes entre elles ($e_s=2\text{m}$, $S = 78.5 \text{ mm}^2$), la tension moyenne dans une suspente vaut $T_s = \omega_1 \cdot e_s = 0.76 \times 2 = 1.52 \text{ kN}$.

Les caractéristiques géométriques et mécaniques sont récapitulées dans le tableau 5-1.

Tableau 5-1 : Caractéristiques géométrique et mécanique de la structure

L (m)	L ₁ ' (m)	S ₀ , S' ₀ (m ²)	S ₁ (m ²)	f ₁ (m)	f ₀ (m)	f ₁ ' (m)	D* (m)
120	E-3	0.2E-2	0.25E-2	3	6	0	12.6

E _c (kN/m ²)	ω'= ω_0 (kN/m)	ω ₁ (kN/m)	H ₁ (kN)	H ₀ (kN)	p (kN/m)	T _s (kN)
110x10 ⁶	1.8	0.76	456	768	2.5	1.52

5-3-2 Résultats numériques et discussions

Les résultats exprimés en termes de la variation des déplacements latéraux le long de la travée de la structure sont illustrés sur les figures 5-4 et 5-5 en comparaison à ceux obtenus par le modèle continu élaboré par Chen [10] et par le modèle discret basé sur la méthode des éléments finis [31]. Un exemple type d'entrée des données et de résultats par le programme BPCVER est illustré à l'annexe C lorsque la structure est partiellement chargée sur la moitié de la travée soit $\alpha_1=0$ et $\alpha_2=0$. Notons par ailleurs que le programme par éléments finis utilisé s'intitule MEF4X implémenté dans le cadre du code MEF de l'université Laval [32] en utilisant un élément fini de câble à 3D développé à cet effet où les déplacements peuvent être grands mais les déformations restent petites.

Deux situations sont considérées :

- Surcharge répartie d'intensité $p = 2.5 \text{ kN/m}$ appliquée soit complètement sur le tablier désigné par le cas LC1 soit partiellement sur la moitié gauche du tablier désigné par LC2.
- Flèche du câble porteur principal (f_0) soit égale à 6 m correspondant à un rapport flèche/travée $f_0/L = 1/20$, ou égale à 12 m soit équivalent à un rapport flèche/travée égal à $1/20$.

Nous remarquons une très bonne concordance des résultats notamment pour le rapport flèche/travée égale à $1/20$ dont l'erreur n'excède guère 1% quelque soit la disposition des

surcharges sur le tablier. Il n'est cependant pas le cas pour $f_0/L = 1/20$, lorsque particulièrement la surcharge est décentrée, où l'erreur relative devient sensible soit de l'ordre de 24 % en comparaison au modèle discrétisé basé par éléments finis. Ce que nous expliquons par la cambrure importante des câbles porteurs principaux qui devient réellement assez profonde dont le rapport flèche/travée $f_0/L = 1/10$ constitue la valeur limite au-delà de laquelle la forme initiale des câbles n'est pas réellement assimilable à une configuration parabolique de 2^{ème} degré qui est l'une des hypothèses principales de la méthode de calcul énumérées à la section 3-3.

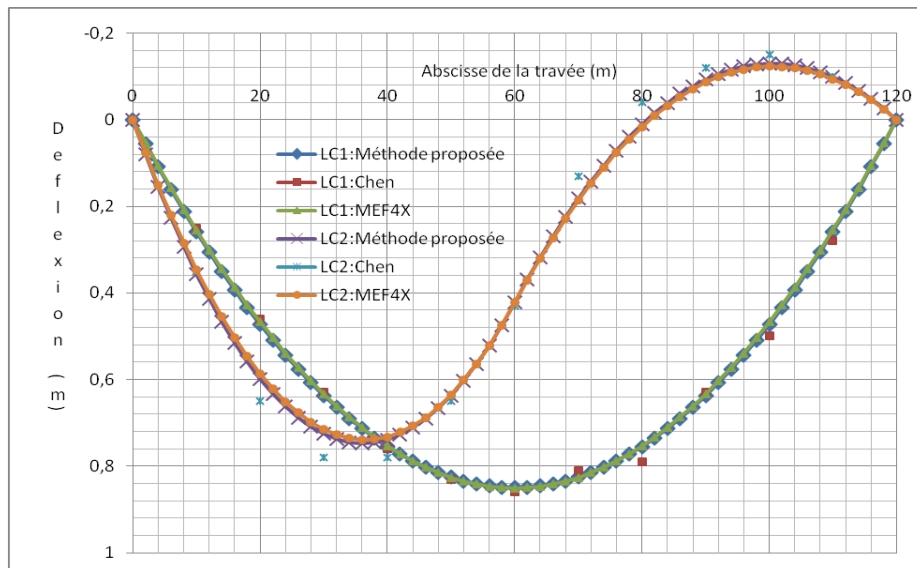


Figure 5-4 : Allure de la déformée pour $f_0/L = 1/20$

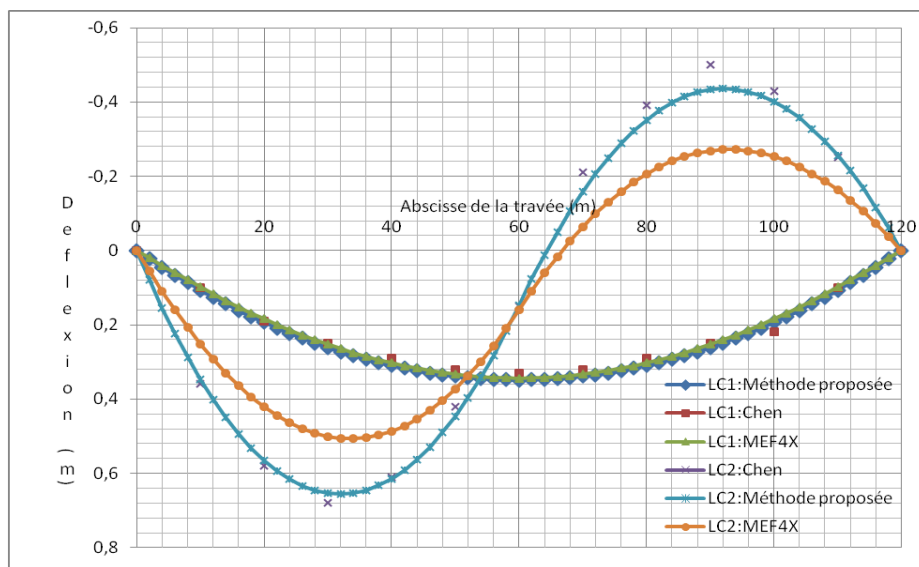


Figure 5-5 : Allure de la déformée pour $f_0/L = 1/10$

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS GENERALES

5-1 Rétrospective

Les objectifs de ce travail consistaient en premier lieu à développer une méthode d'analyse simple mais suffisamment précise et fiable, exploitable sur micro-ordinateur modeste, permettant d'aborder le calcul d'un ouvrage suspendu léger sans poutre de rigidité sollicité dans son propre plan sous des charges verticales. En deuxième lieu, il s'agit de mettre en évidence, au moyen d'une analyse paramétrique, l'effet des paramètres principaux sur le comportement de la structure comme la pré-tension et la cambrure du câble de rigidité, et à établir les valeurs critiques à partir desquels la non linéarité se révèle significative.

La modélisation mathématique, présentée d'une manière succincte, a été effectuée par l'approche fondamentale qui assimile le comportement de la nappe des suspentes à celui d'un voile continu et inextensible. Les fondements théoriques de la méthode de calcul qui est essentiellement non linéaire, sont basés sur l'équation des déplacements orthogonaux et la condition d'immobilité des extrémités des câbles solidaires des massifs d'ancrage. Les équations à caractère non linéaire décrivant les tractées dans les câbles sont établies de façon à être résolues par la méthode de Newton-Raphson à double itération. Par analogie avec la théorie des ponts suspendus à poutre de rigidité, les câbles sont supposés prendre appuis sur les pylônes par l'intermédiaire de chariots de dilatation, afin qu'aucune réaction horizontale ne puisse s'exercer sur les pylônes.

Les hypothèses principales admises qui délimitent les conditions de validité de la méthode de calcul sont les suivantes:

- câble parfaitement flexible qui revient à énoncer en langage structural que, tout au long d'un câble en équilibre, le moment fléchissant est nul;
- inextensibilité des suspentes permettant d'assimiler le comportement de la nappe des suspentes à celui d'un voile continu et inextensible;
- câbles relativement peu profonds correspondant à un rapport flèche/travée ne dépassant pas l'ordre de 1/10 afin d'assimiler les chaînettes fortement aplaties, dans l'état initial, à des paraboles de 2^{ème} degrés;
- Lors du réglage initial, le câble porteur reprend la totalité des charges uniformément réparties dues au poids propre de l'ouvrage y compris le poids de l'ensemble des câbles et des suspentes, et auquel il faut ajouter les effets engendrés par la pré-tension du câble de rigidité.

La méthode est ensuite appliquée à différents aspects de l'analyse d'une passerelle piétonnière rigidifiée par câbles précontraints dont les résultats sont confrontés avec succès à d'autres approches de calcul analytique ou numérique basé sur la méthode des éléments finis. Nous avons ainsi pu examiner par le biais de l'analyse paramétrique l'influence des paramètres clés comme la cambrure, la pré-tension du câble de rigidité et l'intensité des charges appliquées. Les résultats ont été présentés sous forme graphique en vue de montrer l'influence du câble raidisseur cambré sur les déplacements (flèche) et les efforts engendrés dans les câbles en fonction de l'intensité des charges et leurs dispositions respectives. En conséquence, nous avons pu juger de la valeur et du mérite des hypothèses simplificatrices du système continu et nous renseigner sur la non-linéarité géométrique en fonction des paramètres principaux selon les critères admis.

5-2 Conclusions

La méthode de calcul ainsi proposée nous permet de procéder aisément à l'analyse du comportement d'un ouvrage suspendu léger sans poutre de rigidité. Son fondement théorique est simple. Appliquée à une passerelle piétonnière rigidifiée par câble cambré, la méthode semble fiable et efficace. La comparaison des résultats obtenus révèle d'une manière générale une excellente précision que l'on peut obtenir avec la modélisation numérique basée sur le principe de discrétisation par éléments finis. Toutefois, l'invalidité de la méthode de calcul apparaît dans des conditions de pré-tension faible, de charges excessives et du rapport élevé flèche/travée lié au câble porteur en d'autres termes lorsque le comportement de la structure devient nettement non linéaire.

Les hypothèses de la modélisation numérique sont évidemment plus réalistes que les simplifications admises de continuité et d'inextensibilité des suspentes. Cela confère bien entendu au modèle discrétisé plus de souplesse que n'en possède le modèle analytique ou continu puisqu'il permet de tenir compte des conditions d'appuis, de la présence des pylônes et de n'importe qu'elle direction de la sollicitation. L'avantage de la méthode analytique proposée demeure, par conséquent, dans la faible taille du problème résultant qui permet se traiter très aisément sur un micro-ordinateur simple, ce qui répond avec succès à un objectif tant recherché sur le plan théorique et pratique.

Quant aux résultats de l'analyse paramétrique, nous pouvons en dégager les conclusions suivantes :

- La courbure et la précontrainte du câble de rigidité contribuent très efficacement à la stabilité de la structure. Les résultats obtenus démontrent qu'avec des valeurs relativement élevées de la cambrure, on pourrait réduire de façon appréciable (jusqu'à environ 60%) les déplacements et les variations des poussées par rapport à une cambrure quasi-rectiligne qui a été la configuration généralement utilisée jusqu'ici dans les cas pratiques. Ainsi, sans affecter significativement à la hausse du poids propre de la travée, un choix adéquat de ces paramètres permet de réduire la déformabilité à laquelle sont sujettes en majorité ces types de structures suspendues.
- La flèche du câble porteur agit dans le même sens que celle du câble de rigidité : les effets engendrés dans la structure (efforts et déplacements) lui sont inversement proportionnels.

- La non-linéarité observée est du type positif ou favorable et contribue à la rigidification du système ; elle devient de plus en plus importante au fur et à mesure que la cambrure et la précontrainte du câble de rigidité diminuent.

5-3 Recommandations futures

Ce qu'on pourrait enfin suggérer comme études futures pour l'amélioration de ce thème de travail sont les suivantes :

- Poursuivre l'analyse paramétrique afin de montrer l'influence des pylônes (conditions d'appuis, sections, etc.) et des paramètres climatiques, telle la température.
- Effectuer si possible quelques tests en laboratoire en vue de mesurer concrètement la nature des hypothèses émises et d'observer l'influence stabilisatrice de la cambrure qui pourrait être de grande importance pratique pour l'ingénieur.
- Etendre la théorie du modèle dit continu aux charges horizontales, telles que par exemple sous l'effet quasi-statique du vent en exploitant la voie de la théorie des structures hyperstatiques d'ordre infini qui fondamentalement exploite le principe de superposition des petits effets.

References

- [1] Courbon, J., Application de la résistance des matériaux au calcul des ponts, 1950, Dunod, Paris.
- [2] Timoshenko, S.P., The collected papers, 1953 New-York, Mc Graw-Hill Book Company, pp. 448-462.
- [3] Juozpaitis A. and al., 2010. Non linear analysis of suspension bridges with flexible and rigid cables, Journal of Civil Eng. and Mang., 16:1, pp.149-151.
- [4] Troyano L.F., 2003. Bridge engineering-A global perspective, London, Tomas Telford Ltd, 775 p.
- [5] Ryall M.J., Park G.A.R. and Harding J.E., 2003. Manual of bridges engineering London, Tomas Telford Ltd, 1007 p.
- [6] Gimsing N.J., 1997. Cable supported bridges-Concept and design, 2nd ed. Chichester, John Wiley & Sons, 471 p.
- [7] Desai Y.M. and al., Geometric nonlinear static analysis of cable supported structures, 1989, Computers & Structures, V. 29, N° 6, pp. 1001, 1009.
- [8] Goremikins V. and al., Simplified method of determination of natural-vibration frequencies of prestressed suspension bridges, 2013, Procedia Engineering, 57, pp. 343-352.
- [9] Grogorjeva T., Juozpaitis A. and Kamaitis Z., Static analysis and simplified design of suspension bridges having various rigidity of cables, 2010, Journal of Civil Eng. And Mang., 16:3, pp. 363-371.
- [10] Chen Z. and al., A simplified structural mechanics model for cable truss footbridges and its implications for preliminary design, 2014, Engineering Structures, 68, pp. 121-133.
- [11] Grigorjeva T. and Juozpaitis A., Revised engineering method for analysis of behavior of suspension bridge with rigid cables and some aspects of numerical modeling, 2013, Procedia Engineering, 57, pp. 364-371.
- [12] Shrefler B.A. and Odorizzi S., A total lagrangian geometrically non-linear analysis of combined beam and cable structures, 1983, Computers & Structures, V. 17, N° 1, pp. 115, 127.
- [13] Otto, F. et Schleyer, F.K., Cable structures, tensile structures, 1969, V.2, MIT Press, Massachussets.
- [14] Massimo, M., Structures suspendues, système Jawerth, 1971, Interstatic, Bologne, Italie.
- [15] Möllman, H., Analysis of plane prestressed cable structures, ASCE, J. Str. Div., Oct. 1970, pp. 2059-2083.
- [16] IASS Pacific symposium, Tension structures and space Frames, Part II, 1971, Architec. Inst. of Japan Tokyo and Kyoto.
- [17] Ozdemir, H., A finite element approach for cable problems, Int. J. Solids & Structures, Oct.1978, pp. 427-437.
- [18] Gandhir, M. L. et Batchlor, B., A finite element for 3D prestressed cable nets, Int. J. Numer. Methods Eng. V.11, 1977, PP. 905-929.
- [19] Krishna, P., Theoretical analysis of pretensioned cable networks, 1971, IASS Pac. Sym. Part II
- [20] Tottenham, H. et Williams, P.G., Cable net: continuous system analysis, ASCE, J. Eng. M. Div. , June 1970.
- [21] Courbon, J., Structures hyperstatiques d'ordre infini, Annales ITBTP, TMC190, N°334, Déc. 1975, PP. 91-133.
- [22] Siev, A. et Eidelman, J., Stress analysis of prestressed roofs, ASCE, J. Str. Div., Aug. 1967, PP. 103-121.

- [23] Krishna, P. et Sparkes, S.R., An influence coefficient method for pretensioned cable systems, Inst. Civ. Eng. Proc., V41, Nov. 1986, PP. 543-548.
- [24] Krishna, P. et Natrajan, P.R., Analysis of doubly curved suspended cable networks, June 1986, Int. Ass. of Shell Structure, Bul. N°34.
- [25] Krishna, P., Analysis of funicular suspension systems, 1964, Ph. D. thesis, University of London.
- [26] Ministère de l'urbanisme, de logement et des transports, Installation technique pour la surveillance et l'évaluation des ouvrages d'art, 2^{ème} partie, Fascicule 34, Ponts suspendus et ponts haubanés, Direction des routes, Paris, 1979.
- [27] Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), Les ponts suspendus en France, Service d'études techniques des routes et autoroutes, Paris, 1989.
- [28] Timoshenko, S.P., « The collected papers », 1953 New-York, Mc Graw-Hill Book Company, PP. 448-462.
- [29] Dalois M., APL, une approche pratique, Les presses de l'Université Laval, 2^{ème} édition, 1981.
- [30] Sadaoui A., Système continu sous charges verticales des systèmes suspendus légers et sans poutre de rigidité- théorie et applications, Notes transmises personnellement, Janvier 2015.
- [31] Sadaoui A., Programme par éléments finis de calcul des structures suspendus légères et sans poutre de rigidité, version 2014, Projet CNEPRU, N° J0400520140006.
- [32] Datt, G. et Touzot G., Une présentation de la méthode des éléments finis (+Complément), 1981, presses de l'université Laval, Québec.
- [33] Kmet S. and Kokorudova Z., Non-linear closed-form computational model of cable trusses, International Journal of Non-Linear Mechanics, 44, 2009, PP. 735-744.

Annexe A

Calcul des coefficients L_t et L_s

Soient

$$L_t = \int_0^L \left(\frac{ds}{dx} \right)^2 dx \quad ; \quad L_s = \int_0^L \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 dx$$

De la figure 4-1, pour une parabole de flèche f et de longueur L :

$$y = x \operatorname{tg} \theta + \frac{4f}{L^2} x(L-x)$$

en considérant l'élément $ds = \sqrt{1+y'^2} dx$, on déduit en posant $U = \frac{4f}{L} \left(1 - 2\frac{x}{L}\right) \cos \theta$:

$$\cos^2 \theta \left(\frac{ds}{dx} \right)^2 = 1 - 2U \sin \theta + U^2$$

on peut calculer alors aisément les développements en série de Taylor de $\left(\frac{ds}{dx}\right)^n$ et l'on parvient sans peine aux formules suivantes :

$$L_t = L \left[\frac{1}{\cos^2 \theta} + \frac{16}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right]$$

$$L_s = L \left[\frac{1}{\cos^3 \theta} + 8 \left(\frac{f}{L} \right)^2 \frac{1 + \sin^2 \theta}{\cos \theta} + \frac{96}{5} \left(\frac{f}{L} \right)^4 \cos^5 \theta + \dots \right]$$

Annexe C

Exemple d'utilisation du programme BPCVER sans analyse paramétrique (IR=1) appliqué à une structure suspendue dépourvue de haubans d'ancrage

Soit l'exemple de la section 5-3-1 (fig. 5-2, tab. 5-1) C lorsque la structure est partiellement chargée sur la moitié de la travée soit $\alpha_1=0$ et $\alpha_2=0$.

C-1 Entrée interactive des données (sur écran)

E:\APL_ PROGRAM\CHARGEVER saved Mon Jul 13 20:04:54 2015

BPCVER

ETUDE SOUS CHARGES VERTICALES

DONNEES GENERALES SOUS CHARGES VERTICALES

0:RAPPEL DES DONNEES D'ENTREES ET IMPRESSION
DES RESULTATS AVEC CERTAINS DETAILS INTERMEDIAIRES

1:RAPPEL SEULEMENT DES DONNEES ET IMPRESSION
DES RESULTATS PRINCIPAUX

QUEL NIVEAU DESIREZ-VOUS?

: **RN :**
0 **0**

DEUX TYPES DE REPNSES SONT POSSIBLES

0: OUI

1: NON

DESIREZ-VOUS FAIRE UNE ETUDE PARAMETRIQUE

: **IR :**
1 **1**

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DE LA STRUCTURE
SONT-ELLES DEJA ENTREES

: **RP:**
1 **1**

1- COORDONNEES GEOMETRIQUES

X=0: BASE DES PYLONNES

Y=0:EXTREMITE EXTERIEURE DU CABLE DE RIVE GAUCHE

COOR X COOR Y

: 0.001 0.1

: 0.002 0.100001

: 120.002 0.100001
: 120.003 0.1
: 0

MCOOR :
0.001 0.1
0.002 0.100001
120.002 0.100001
120.003 0.1

DESIREZ-VOUS CORRIGER CES VALEURS?

: 1

2- PROPRIETES GEOMETRIQUES DES CABLES
FLECHE ET SECTION DES CABLES PORTEURS
FLECHE (M) AIRE(M2)

: 0 0.002
: 6 0.002
: 0 0.002
: 0

MPGCAB :
0 0.002
6 0.002
0 0.002

FLECHE ET SECTION DES CABLES TENDEURS
FLECHE

: -3.0

F1 :
-3.0

SECTION

: 0.0025

S1 :
0.002

DESIREZ-VOUS CORRIGER CES VALEURS?

: 1

3- PROPRIETE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION
M. D'ELASTICITE POIDS PROPRE TOTAL DE L'OUVRAGE/ML

: 110000000 1.8

EC:
110000000

W0:
1.8

DESIREZ-VOUS CORRIGER CES VALEURS?

: 1

CHARGEMENT
CHARGES UNIFORMES
INTENSITEE (S) POSITIONS: X1 X2

: 2.5 0.0 60.0
: 0

MCUNIF:
2.5 0.0 60.0

CHARGES CONCENTREES

INTENSITE (S) POSITION (S): X

: 0.0 60.0

: 0

MCCONC:
0.0 60.0

DESIREZ-VOUS CORRIGER CES VALEURS?

: 1

PRECONTRAINTE INITIALE H1:

: 456

H1:
456

C-2 Fichier des résultats (ou de sortie)

SOLUTION X AND Y = 2.358E2 -8.520E1

EVALUATION DES DEFLEXIONS

DONNEZ LE NOMBRE DE POINTS DESIRES (A DISTANCE EGALE)

: 59

N:
59

ABSCISSE DEFLEXION
(m) (m)

0.000E0 0.000E0
2.000E0 8.037E-2
4.000E0 1.562E-1
6.000E0 2.274E-1
8.000E0 2.940E-1
1.000E1 3.561E-1
1.200E1 4.136E-1
1.400E1 4.666E-1
1.600E1 5.149E-1
1.800E1 5.587E-1
2.000E1 5.979E-1
2.200E1 6.325E-1
2.400E1 6.626E-1
2.600E1 6.881E-1
2.800E1 7.090E-1
3.000E1 7.253E-1
3.200E1 7.371E-1
3.400E1 7.443E-1
3.600E1 7.469E-1
3.800E1 7.449E-1
4.000E1 7.384E-1
4.200E1 7.273E-1
4.400E1 7.116E-1
4.600E1 6.913E-1
4.800E1 6.665E-1
5.000E1 6.371E-1

5.200E1	6.031E ⁻¹
5.400E1	5.646E ⁻¹
5.600E1	5.215E ⁻¹
5.800E1	4.738E ⁻¹
6.000E1	4.215E ⁻¹
6.200E1	3.683E ⁻¹
6.400E1	3.178E ⁻¹
6.600E1	2.700E ⁻¹
6.800E1	2.248E ⁻¹
7.000E1	1.824E ⁻¹
7.200E1	1.427E ⁻¹
7.400E1	1.057E ⁻¹
7.600E1	7.142E ⁻²
7.800E1	3.982E ⁻²
8.000E1	1.092E ⁻²
8.200E1	-1.529E ⁻²
8.400E1	-3.879E ⁻²
8.600E1	-5.959E ⁻²
8.800E1	-7.769E ⁻²
9.000E1	-9.309E ⁻²
9.200E1	-1.058E ⁻¹
9.400E1	-1.158E ⁻¹
9.600E1	-1.231E ⁻¹
9.800E1	-1.277E ⁻¹
1.000E2	-1.296E ⁻¹
1.020E2	-1.288E ⁻¹
1.040E2	-1.253E ⁻¹
1.060E2	-1.191E ⁻¹
1.080E2	-1.102E ⁻¹
1.100E2	-9.855E ⁻²
1.120E2	-8.424E ⁻²
1.140E2	-6.723E ⁻²
1.160E2	-4.752E ⁻²
1.180E2	-2.511E ⁻²
1.200E2	0.000E0

CALCUL DES EFFORTS DANS LES CABLES ET SUSPENTES

ABSCISSE (m)	CABLE PORTEUR (kN)	CABLE DE RIGIDITE (kN)	SUSPENTES (kN)
0.000E0	1.033E3	3.745E2	5.388E0
2.000E0	1.031E3	3.742E2	5.388E0
4.000E0	1.029E3	3.739E2	5.388E0
6.000E0	1.027E3	3.737E2	5.388E0
8.000E0	1.025E3	3.734E2	5.388E0
1.000E1	1.023E3	3.732E2	5.388E0
1.200E1	1.021E3	3.729E2	5.388E0
1.400E1	1.020E3	3.727E2	5.388E0
1.600E1	1.018E3	3.725E2	5.388E0
1.800E1	1.017E3	3.723E2	5.388E0
2.000E1	1.015E3	3.721E2	5.388E0
2.200E1	1.014E3	3.720E2	5.388E0
2.400E1	1.013E3	3.718E2	5.388E0
2.600E1	1.012E3	3.717E2	5.388E0
2.800E1	1.011E3	3.715E2	5.388E0
3.000E1	1.010E3	3.714E2	5.388E0
3.200E1	1.009E3	3.713E2	5.388E0
3.400E1	1.008E3	3.712E2	5.388E0

3.600E1	1.007E3	3.711E2	5.388E0
3.800E1	1.006E3	3.710E2	5.388E0
4.000E1	1.006E3	3.710E2	5.388E0
4.200E1	1.005E3	3.709E2	5.388E0
4.400E1	1.005E3	3.709E2	5.388E0
4.600E1	1.004E3	3.708E2	5.388E0
4.800E1	1.004E3	3.708E2	5.388E0
5.000E1	1.004E3	3.708E2	5.388E0
5.200E1	1.004E3	3.708E2	5.388E0
5.400E1	1.004E3	3.708E2	5.388E0
5.600E1	1.004E3	3.708E2	5.388E0
5.800E1	1.004E3	3.709E2	5.388E0
6.000E1	1.004E3	3.709E2	1.737E0
6.200E1	1.004E3	3.710E2	1.737E0
6.400E1	1.005E3	3.710E2	1.737E0
6.600E1	1.005E3	3.710E2	1.737E0
6.800E1	1.005E3	3.710E2	1.737E0
7.000E1	1.005E3	3.711E2	1.737E0
7.200E1	1.006E3	3.711E2	1.737E0
7.400E1	1.006E3	3.711E2	1.737E0
7.600E1	1.006E3	3.711E2	1.737E0
7.800E1	1.007E3	3.712E2	1.737E0
8.000E1	1.007E3	3.712E2	1.737E0
8.200E1	1.008E3	3.712E2	1.737E0
8.400E1	1.008E3	3.713E2	1.737E0
8.600E1	1.008E3	3.713E2	1.737E0
8.800E1	1.009E3	3.714E2	1.737E0
9.000E1	1.010E3	3.714E2	1.737E0
9.200E1	1.010E3	3.714E2	1.737E0
9.400E1	1.011E3	3.715E2	1.737E0
9.600E1	1.011E3	3.715E2	1.737E0
9.800E1	1.012E3	3.716E2	1.737E0
1.000E2	1.013E3	3.716E2	1.737E0
1.020E2	1.013E3	3.717E2	1.737E0
1.040E2	1.014E3	3.717E2	1.737E0
1.060E2	1.015E3	3.718E2	1.737E0
1.080E2	1.016E3	3.718E2	1.737E0
1.100E2	1.017E3	3.719E2	1.737E0
1.120E2	1.017E3	3.719E2	1.737E0
1.140E2	1.018E3	3.720E2	1.737E0
1.160E2	1.019E3	3.721E2	1.737E0
1.180E2	1.020E3	3.721E2	1.737E0
1.200E2	1.021E3	3.722E2	1.737E0