

ÉTUDE THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE DES PONTS À CÂBLES DE TRÈS GRANDE PORTÉE: PONTS SUSPENDUS ET PONTS HYBRIDES

THÈSE N° 1290 (1994)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

DAVID AMSLER

Ingénieur civil diplômé EPF
Master of Science, Stanford University, USA
originaire de Schinznach Dorf (AG)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. R. Walther, rapporteur
Dr H.-G. Dauner, corapporteur
Prof. N. J. Gimsing, corapporteur
Prof. L. Pflug, corapporteur
Prof. B. Thürlimann, corapporteur

Lausanne, EPFL
1994

Sommaire

Préface

Remerciements

Résumés

Table des matières

Première partie:	Introduction et objectifs
Chapitre 1	Introduction
Deuxième partie:	Bases théoriques et méthodes de calcul
Chapitre 2	Bases de calcul informatique
Chapitre 3	Charges de vent et action sur les ponts à câbles
Chapitre 4	Vitesse critique de flottement et de déversement latéral
Troisième partie:	Applications
Chapitre 5	Ponts suspendus de grande portée
Chapitre 6	Ponts hybrides de grande portée
Quatrième partie:	Essais en soufflerie
Chapitre 7	Dimensionnement et construction du modèle
Chapitre 8	Résultats des essais
Cinquième partie:	Conclusions
Chapitre 9	Conclusions générales

Annexes

Littérature

Curriculum Vitae

Résumé

Depuis de nombreuses années, le record de portée des ouvrages de génie civil fait l'objet de nombreuses convoitises. La portée maximale d'un ouvrage en construction à ce jour est de 1990 m (Akashi-Kaikyo, Japon). Des ponts de plus grande portée encore seront construits à l'avenir. A cet égard le concept de pont hybride (combinaison optimale entre haubanage et suspension) proposé à l'origine par Roebling et Dischinger, puis plus récemment par Gimsing, Schlaich et Walther semble prometteur. Cette thèse a pour but l'étude de la faisabilité des ponts hybrides de très grande portée.

Comparés aux ponts suspendus, les ponts hybrides de grande portée offrent des avantages majeurs: une plus grande rigidité verticale donc des déformations sous surcharges de trafic plus faibles et un comportement aérodynamique plus performant.

De plus, il ressort d'une étude économique détaillée que plus la portée de l'ouvrage augmente, plus la différence de coût entre les ponts suspendus et les ponts hybrides est marquée. Bien que la faisabilité d'un pont de plus de deux kilomètres de portée centrale soit sujette à de nombreux problèmes techniques (montage en particulier), les économies possibles en matériau (câbles en particulier) pour des ponts hybrides par rapport à des ponts suspendus sont très importantes.

Pour le coût total de l'ouvrage, on peut s'attendre à une économie de l'ordre de 10 à 20%. Ce gain a été confirmé lors de l'étude d'une variante d'entreprise en pont hybride pour le pont Est du Storebaelt (portée centrale 1624 m). Une différence similaire est également mise en évidence pour le projet de pont du golf d'Izmit en Turquie de deux kilomètres de portée centrale.

L'utilisation de nouveaux matériaux de construction n'est qu'esquissée. L'utilisation de matériaux composites par exemple est encore au stade d'essais préliminaires et de nombreuses questions techniques (élasticité, coûts) doivent encore être résolues.

Ce travail est présenté en cinq parties:

- La première partie (chapitre 1) résume les tendances actuelles de l'évolution des ponts à câbles de grande portée et motive l'étude par un descriptif sommaire des ouvrages projetés ou en cours de réalisation.
- La deuxième partie (chapitres 2, 3 et 4) donne les bases de la théorie des éléments finis et la résolution dynamique de systèmes d'éléments finis complexes, de la modélisation des charges de vent et la réponse des ponts à câbles. Les théories permettant de déterminer la vitesse critique de flottement du tablier sont décrites et comparées sur la base de deux exemples.
- La troisième partie (chapitre 5 et 6) concerne l'application numérique de la théorie des déformations et les théories présentées dans la deuxième partie aux ponts suspendus et aux ponts hybrides de grande portée. De nombreux paramètres sont modifiés et leur influence sur le comportement aérodynamique est étudié. Cette partie est complétée par une étude du montage et du coût des ouvrages proposés.

- La quatrième partie (chapitre 7 et 8) présente le dimensionnement, la construction, les tests et les résultats d'essais en soufflerie sur un pont hybride au Danish Maritime Institute (DMI). L'influence de la rigidité, du poids propre du tablier ainsi que des conditions d'appui sur la stabilité aérodynamique d'un ouvrage de grande portée est analysée expérimentalement.
- La cinquième partie (chapitre 9) résume les principaux résultats de l'étude et ouvre la voie à des recherches ultérieures.

Ces études théoriques et expérimentales confirment l'intérêt des ponts hybrides pour des ouvrages de très grande portée sous charge utiles élevées (trafic ferroviaire par exemple) et soumis à de fortes charges de vent. De plus, le coût réduit de la superstructure et la rapidité de montage permettent aux ponts hybrides de concurrencer les ponts suspendus classiques.

Sur cette base, il est recommandé d'étudier l'application du concept de pont hybride pour les nombreux projets de ponts à câbles de très grande portée du XXI^e siècle.

Zusammenfassung

Seit vielen Jahren wird versucht, den Spannweitenrekord im Brückenbau immer weiter zu steigern. Die grösste Spannweite aller zum gegenwärtigen Zeitpunkt im Bau befindlichen Brücken liegt bei 1990 m (Akashi-Kaikyo, Japan). In Zukunft werden Brücken mit noch grösseren Spannweite gebaut werden. In diesem Zusammenhang ist das Konzept der hybriden Brücke (Kombination von Hänge- und Schrägseilbrücke) vielversprechend, das zuerst von Roebling und Dischinger vorgeschlagen und in neuerer Zeit von Gimsing, Schlaich und Walther weiterentwickelt wurde. Diese Arbeit hat zum Ziel, eine Machbarkeitstudie für Hybridbrücken sehr grosser Spannweite durchzuführen.

Im Vergleich zu Hängebrücken bieten hybride Brücken massgebende Vorteile: sie sind vertikal steifer, daher sind vertikale Verformungen unter Verkehrslast kleiner, und sie weisen ein besseres aerodynamisches Verhalten auf.

Zusätzlich sind hybride Brücken im Vergleich zu Hängebrücken finanziell sehr attraktiv. Je grösser die Spannweite, desto grösser der Gewinn. Obwohl die Konstruktion einer Brücke mit einer Spannweite von mehr als zwei Kilometern mit vielen technischen Problemen verbunden ist (insbesondere hinsichtlich der Montage), ist die Materialeinsparung hybrider Brücken im Vergleich zu normalen Hängebrücken beträchtlich: Für die Gesamtkosten des Bauwerkes kann mit Einsparungen in der Grössenordnung von 10 bis 20 % gerechnet werden.

Diese Zahlen sind bei der Untersuchung einer Varianten für die Storebaelt-Ostbrücke in Dänemark (Spannweite 1624 m) und bei einem Projekt über den Izmit-Golf in der Türkei (2000 m) bestätigt worden.

Neue Materialien sind heutzutage für Brücken mit sehr grossen Spannweiten in der Diskussion. Insbesondere sind Komposit-Materialien für die Hauptkabel und Versteifungsträger vorgeschlagen worden. Diese neue Entwicklung ist aber mit vielen technischen Problemen verbunden (Elastizität, Kosten) und wird daher nur skizzenhaft erwähnt.

Die Studie ist wie folgt unterteilt:

- Der erste Teil (Kap.1) fasst den Stand der heutigen Entwicklung von Kabelbrücken zusammen. Eine Liste der gegenwärtigen Projekte und Brücken im Bau gibt die grundsätzliche Motivierung zu dieser Arbeit.
- Der zweite Teil (Kap. 2, 3 und 4) gibt die theoretischen Grundlagen der Finiten-Elemente-Theorie und der Lösung von dynamischen Systemen, der Windbelastungen und deren Aktionen auf Kabelbrücken. Die bestehende Theorien des Flatterns sind beschrieben und mit numerischen Beispielen verglichen.
- Der dritte Teil (Kap. 5 und 6) betrifft die Anwendung der bestehenden Verformungstheorie und der Theorien des Flatterns auf Hängebrücken und hybride Brücken. Der Einfluss mehrerer Parameter auf die kritische Windgeschwindigkeit wird untersucht. Dieser Teil wird mit einer Untersuchung zur Montage und mit einer ökonomischen Studie der vorgeschlagenen Konstruktionen abgeschlossen.

- Im vierten Teil (Kap. 7 und 8) sind die Versuche im Windkanal beschrieben: Bemessung, Konstruktion, Durchführung der Versuche und Resultate. Die Einflüsse der Trägersteifigkeit, des Fahrbahneigengewichtes sowie der Auflagerreaktionen auf das aerodynamische Verhalten der Brücken werden mittels eines aeroelastischen Modelles untersucht.
- Der fünfte Teil (Kap. 9) fasst die Hauptresultate der Studie zusammen. Themen für weiterführende Versuche werden angegeben.

Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen bestätigen die Machbarkeit grosser hybrider Brücken unter erheblichen Verkehrs- und Windbelastungen. Darüberhinaus ist die Kostenreduktion und die raschere Konstruktion hybrider Brücken von grossem Vorteil.

Auf dieser Grundlage kann empfohlen werden, die Anwendung des Konzeptes der hybriden Brücken auf die zahlreichen in 21. Jahrhundert austehenden Projekte für grosse Kabelbrücken zu untersuchen.

Summary

Since the end of the 18th century the pride of civil engineers has been placed in the main span of large bridges. By now, the largest span in construction is the 1990 m main span of the Akashi-Kaikyo Bridge, Japan. Even larger bridges will be built in the future. In this regard hybrid bridges (combination of suspension and cable-stayed bridges) are of great interest. This combination has first been proposed by Roebling and Dischinger, then by Gimsing, Schlaich and Walther. The author has studied the feasibility of very long span hybrid bridges.

In comparison with pure suspension bridges, hybrid bridges have major advantages: the stiffness of their cable system is larger than the one of suspension bridges. Therefore, the vertical deformation under live load is smaller and the aerodynamic stability of the bridge is increased.

Furthermore, a detailed economic study has shown that hybrid bridges are cheaper than suspension bridges. The larger the spans, the greater the cost difference. Even though the feasibility of a bridge with a main span of more than two kilometers is linked with numerous technical problems (erection for example), the quantity of construction materials (especially the cables) is lower for a hybrid bridge than for a suspension bridge.

These differences have been demonstrated by a contractor's alternate design of the Great Belt East Bridge in Denmark (main span 1624 m) and for the Izmit Gulf Crossing in Turkey (main span 2000 m).

The use of new construction materials has not been studied. In fact, the use of composite materials is nowadays studied in numerous locations without solving the basic problems linked with it (low modulus of elasticity and high costs).

This thesis is divided into five parts:

- In the first part (chap. 1), the actual developments of large cable supported bridges are described. Presentation of worldwide projects and bridges under construction gives the motivation for the work.
- In the second part (chap. 2, 3 and 4) the theoretical basis are given. Finite Element methods and the resolution of dynamic problems, wind modeling and the action of wind on cable-supported bridges are summarized. The existing theories allowing to define the flutter wind speed of the deck are presented and compared on the basis of two numerical examples.
- In the third part (chap. 5 and 6), the deflection theory and the theories described in the second part are applied to fictitious long-span cable-supported bridges. The critical wind speed of numerous structures is computed and compared. In particular, suspension bridges ranging from 1 to 5 km are compared with hybrid bridges with the same spans. This part is completed by a study of the construction phases and of the costs of this two types of structures.

- In the fourth part (chap. 7 and 8) the design, construction, tests and results of wind tunnel tests on hybrid bridges at the Danish Maritime Institute (DMI) are presented. The influence of girder rigidity and dead load, and the influence of support conditions are studied experimentally.
- In the fifth part (chap. 9) the main findings of the study are summarized and the possible domains for further study are listed.

The theoretical and experimental investigations confirm the advantages of hybrid bridges in comparison to pure suspension bridges for spanning large openings, and thus especially for projects with heavy live loads and high design wind speeds. In addition, lower costs and fast construction give to hybrid bridges a great advantage toward classical suspension bridges.

It is therefore recommended that the application of this combined system should be studied for the numerous projects of the 21st century.

Table des matières

Sommaire

Préface

Remerciements

Résumés

PARTIE 1: INTRODUCTION ET OBJECTIFS *****

1. <u>Introduction</u>	<u>Page</u>
1.1. Sujet, buts et organisation de l'étude	
1.1.1 Sujet	1.1
1.1.2 Buts	1.2
1.1.3 Organisation de l'étude	1.3
1.2. Evolution, réalisations et projets actuels	
1.2.1 Evolution des ponts de grande portée	1.5
1.2.2 Evolution des ponts haubanés de grande portée	1.7
1.2.3 Réalizations et projets actuels	1.9
1.3. Développements futurs	
1.3.1 Introduction	1.27
1.3.2 Nouveaux matériaux	1.27
1.3.2.1 Câbles en matériaux composites	1.27
1.3.2.2 Tablier en fibres de carbone	1.28
1.3.3 Nouveaux systèmes statiques	
1.3.3.1 Systèmes spatiaux	1.29
1.3.3.2 Modes de montage	1.29
1.3.3.3 Ancrage au sol, ponts bi-haubanés	1.30
1.3.4 Nouvelles sections transversales	
1.3.4.1 Sections aérodynamiques	1.32
1.3.4.2 Sections elliptiques	1.32
1.4. Recherches entreprises à l'EPFL - IBAP	
1.4.1 "Ponts haubanés à tablier mince", rapport d'essai	1.33
1.4.2 "Analyse du comportement aéroélastique des ponts haubanés à tablier mince", rapport EPFL	1.34
1.4.3 "Comportement et stabilité des ponts haubanés à tablier mince", thèse J.-F. Klein	1.34
1.4.4 "Pont haubané courbe de Schaffhouse", rapport intermédiaire d'essai	1.35

PARTIE 2: BASES THEORIQUES ET METHODES DE CALCUL

<u>2. Bases du calcul informatique</u>		<u>Page</u>
2.1.	Modèle d'éléments finis	
2.1.1	Formulation des éléments finis	2.1
2.1.2	Calcul non-linéaire géométrique et matériel	2.2
2.1.2.1	Calcul non-linéaire géométrique	2.2
2.1.2.2	Calcul non-linéaire matériel	2.2
2.1.2.3	Méthode itérative de calcul	2.3
2.1.3	Calcul dynamique	2.4
2.1.3.1	Méthode des sous-espaces d'itération	2.5
2.1.3.2	Etat de contrainte du système	2.6
2.2.	Types d'éléments	
2.2.1	Eléments 'barre'	2.7
2.2.2	Eléments 'câble'	2.7
2.2.3	Eléments 'cadre'	2.8
2.2.4	Elément 'coque'	2.9
2.3.	Programmes informatiques	
2.3.1	FINELG	2.10
2.3.2	DESFIN	2.10
2.3.3	Programmes informatiques du Danish Maritime Institute	2.10
2.3.3.1	Aquisition des données	2.10
2.3.3.2	Analyse des données	2.11
2.3.4	Autres programmes	2.11
2.4.	Supports informatiques	
2.4.1	Ordinateur du Département de génie civil (DGC)	2.11
2.4.2	Ordinateurs personnels	2.11
<u>3. Charge de vent et actions du vent sur la superstructure des ponts</u>		
3.1.	Charges du vent	
3.1.1	Introduction	3.1
3.1.2	Nature du vent	3.1
3.1.3	Influence de la rugosité du sol	3.2
3.1.4	Influence du relief	3.4
3.1.5	Vitesses extrêmes	3.5
3.1.6	Direction	3.7
3.1.7	Turbulences	3.7
3.2.	Réponse du tablier d'un pont au charges du vent	
3.2.1	Introduction	3.10
3.2.2	Instabilité aérodynamique globale du tablier	3.10
3.2.3	Vibration des câbles	3.11
3.2.4	Instabilité des éléments structuraux	3.12

	<u>Page</u>
3.3. Essais en soufflerie	
3.3.1 Introduction	3.13
3.3.2 Essais sur modèle de section	3.13
3.3.3 Essais sur modèle "tau-strip"	3.15
3.3.4 Essais sur modèles aéroélastiques complets	3.16

4. Vitesse critique de flottement et de déversement latéral

4.1. Introduction	
4.1.1 Buts et méthodologie	4.1
4.1.2 Chronologie des études analytiques et empiriques	4.1
4.1.3 Hypothèses de base	4.2
4.1.4 Table des notations	4.3
4.1.5 Exemples choisis	4.5
4.1.5.1 Premier pont de Tacoma	4.5
4.1.5.2 Golden Gate avant renforcement en 1951	4.6
4.2. Méthodes analytiques traditionnelles	
4.2.1 Méthode analytique de Theodorsen	4.8
4.2.2 Méthode analytique de Bleich	4.12
4.2.3 Méthode analytique de Rocard	4.15
4.2.4 Méthode analytique de Frandsen	4.17
4.3. Méthodes empiriques	
4.3.1 Critère d'instabilité d'Amman	4.20
4.3.2 Formule de Selberg	4.21
4.3.3 Instabilité aérostatique d'Herzog	4.24
4.4. Etudes semi-analytiques	
4.4.1 Etude théorique et empirique de Klöppel	4.26
4.4.2 Méthode de Scanlan et Sabzevari	4.28
4.5. Méthodes analytiques modernes	
4.5.1 Etude analytique de Starossek	4.34
4.5.2 Etude analytique de Kovacs, Svensson et Jordet	4.47
4.5.3 Méthode analytique à trois degrés de liberté	4.48
4.6. Conclusions	4.49
4.6.1 Premier pont de Tacoma	4.50
4.6.2 Golden Gate avant renforcement en 1951	4.50
4.6.3 Commentaires	4.51

PARTIE 3: APPLICATIONS

<u>5. Ponts suspendus de grande portée</u>		<u>Page</u>
5.1.	Historique	
5.1.1	Historique de l'évolution des ponts suspendus	5.1
5.1.2	Historique des instabilités aérodynamiques	5.4
5.1.3	Renforcement des ponts suspendus	5.5
5.1.3.1	Renforcement du tablier	5.6
5.1.3.2	Renforcement par haubanage	5.7
5.1.4	Mesures constructives pour améliorer la stabilité aérodynamique	5.8
5.1.4.1	Choix de la forme des sections transversales	5.9
5.1.4.2	Ouverture longitudinale dans le tablier	5.9
5.1.4.3	Inclinaison des suspentes	5.11
5.1.4.4	Liaison rigide câble/tablier	5.11
5.1.4.5	Réduction du rapport h/L	5.12
5.1.4.6	Configuration du tablier au droit des pylônes	5.13
5.1.4.7	Réduction de la déformation horizontale du tablier	5.13
5.1.5	Organisation du chapitre	5.13
5.2.	Calculs statiques	
5.2.1	Modèle statique	5.15
5.2.2	Méthodes analytiques traditionnelles	5.16
5.2.2.1	Poids propre	5.17
5.2.2.2	Surcharges	5.17
5.2.3	Exemple de calcul statique - pont sur le fleuve Orénoque	5.18
5.2.3.1	Elévation	5.18
5.2.3.2	Tablier	5.18
5.2.3.3	Pylônes	5.19
5.2.3.4	Câbles principaux et suspentes	5.20
5.2.3.5	Charges	5.20
5.2.4	Modélisation par éléments finis - deux dimensions	
5.2.4.1	Constitution du modèle	5.20
5.2.4.2	Résultats	5.21
5.2.5	Modélisation par éléments finis - trois dimensions	
5.2.5.1	Constitution du modèle	5.24
5.2.5.2	Résultats	5.25
5.2.6	Validité du modèle d'éléments finis pour l'étude aérodynamique	5.26
5.3.	Etude aérodynamique	
5.3.1	Introduction	5.27
5.3.2	Modes et fréquences propres de vibration	5.27
5.3.3	Méthode analytique de Bleich	5.31
5.3.4	Méthode analytique de Rocard	5.32
5.3.5	Application du critère d'Amman	5.32
5.3.6	Etude selon Starossek	5.33
5.3.7	Discussion	5.34

	<u>Page</u>
5.4. Etude paramétrique	
5.4.1 Introduction	5.35
5.4.2 Rigidification par haubannage	5.35
5.4.2.1 Rigidification par quatres paires de haubans	5.36
5.4.2.2 Rigidification par huit paires de haubans	5.37
5.4.3 Répartition du poids propre du tablier (béton/acier)	5.38
5.4.4 Tablier continu au droit des pylones	5.39
5.4.5 Ancrage des câbles principaux dans le tablier	5.40
5.4.6 Variation de la rigidité flexionnelle et torsionnelle	5.41
5.4.7 Discussion	5.42
5.5. Ponts suspendus de grande portée (1 à 5 km)	
5.5.1 Description générale	5.44
5.5.2 Dimensions générales des ouvrages	5.44
5.5.2.1 Elévation	5.45
5.5.2.2 Section transversale	5.45
5.5.2.3 Pylônes	5.46
5.5.2.4 Câbles principaux et suspentes	5.48
5.5.2.5 Charges	5.48
5.5.3 Prédimensionnement des structures	5.49
5.5.4 Réglage sous poids propre	5.50
5.5.5 Dimensionnement	5.51
5.5.5.1 Modélisation par éléments finis	5.52
5.5.5.2 Résultats	5.53
5.5.6 Etude aérodynamique	5.55
5.5.6.1 Modélisation par éléments finis	5.55
5.5.6.2 Modes propres de vibration	5.56
5.5.6.3 Méthode de Bleich/Sleberg	5.57
5.5.6.4 Méthode de Starossek	5.58
5.5.7 Influence de la continuité du tablier sur V_{crit}	5.59
5.5.8 Conclusions sur l'étude aérodynamique des ponts suspendus de grande portée	5.61
5.6. Conclusions sur l'étude des ponts suspendus	5.62

6. Ponts hybrides de grande portée

6.1. Historique	
6.1.1 Historique de l'évolution des ponts hybrides	6.1
6.1.2 Organisation du chapitre	6.6
6.2. Calculs statiques	
6.2.1 Développement historique des calculs	6.7
6.2.2 Description générale	6.7
6.2.3 Dimensions générales des ouvrages	6.8
6.2.3.1 Elévation	6.8
6.2.3.2 Tablier	6.10
6.2.3.3 Pylônes	6.12
6.2.3.4 Câbles principaux et suspentes	6.14

	<u>Page</u>	
6.2.3.5	Haubans	6.16
6.2.3.6	Surcharges	6.17
6.2.4	Prédimensionnement	6.18
6.2.5	Réglage des ponts hybrides sous poids propre	6.19
6.2.6	Dimensionnement	6.21
6.2.6.1	Modélisation par éléments finis	6.21
6.2.6.2	Résultats	6.22
6.2.6.3	Discussion	6.27
6.2.7	Limitation de la portée d'un point de vue statique	6.28
6.2.7.1	Hauteur des pylônes	6.28
6.2.7.2	Longueur et flèche des haubans	6.29
6.2.7.3	Compression dans le tablier	6.30
6.2.7.4	Dilatations thermiques	6.30
6.3.	Etude aérodynamique	
6.3.1	Modélisation par éléments finis - trois dimensions	6.32
6.3.2	Modes et fréquences propres de vibration	6.34
6.3.3	Vitesse critique de flottement	6.36
6.3.3.1	Méthode de Bleich/Selberg	6.36
6.3.3.2	Méthode de Starossek	6.37
6.3.4	Limitation de la portée centrale d'un point de vue aérodynamique	6.41
6.4.	Etude paramétrique	
6.4.1	Introduction	6.41
6.4.2	Rapport H/L	6.41
6.4.3	Poids propre du tablier de la zone haubanée	6.43
6.4.4	Rigidité des pylônes	6.44
6.4.5	Forme de la section transversale	6.45
6.5.6	Conclusions	6.45
6.5.	Montage	
6.5.1	Introduction	6.46
6.5.2	Schéma de montage	6.46
6.5.3	Programme des travaux	6.48
6.6.	Estimation des coûts	
6.6.1	Décomposition globale des coûts	6.50
6.6.2	Estimation des prix unitaires	6.51
6.6.3	Comparaison entre ponts suspendus et ponts hybrides	6.51
6.6.4	Coût des câbles	6.53
6.6.5	Influence du rapport H/L sur les coûts	6.55
6.6.6	Conclusions	6.55
6.7.	Conclusions sur l'étude théorique des ponts hybrides	6.57

PARTIE 4: ESSAIS EN SOUFLERIE

<u>7. Dimensionnement et construction du modèle</u>		<u>Page</u>
7.1	Introduction	
7.1.1	Elaboration du modèle	7.1
7.1.2	Soufflerie du DMI	7.2
7.2	Règles de dimensionnement	
7.2.1	Paramètres de dimensionnement	7.4
7.3	Dimensionnement du modèle de pont hybride	
7.3.1	Concept général	7.7
7.3.2	Tablier	7.8
7.3.3	Pylônes	7.10
7.3.4	Câblage	7.11
7.3.5	Culée	7.12
7.3.6	Dispositif d'appui	7.13
7.4	Construction du modèle	
7.4.1	Description générale	7.15
7.4.2	Phases de montage de la configuration de base	7.15
7.4.3	Modifications du modèle	7.19
7.5	Dispositif de mesure	
7.5.1	Concept général	7.22
7.5.2	Mesures de vitesse de vent	7.22
7.5.3	Mesures de déplacement	7.23
7.5.4	Mesures d'accélération	7.24
7.5.5	Mesures de température et de pression atmosphérique	7.24
7.5.6	Présentation des résultats	7.24
7.6	Conclusions	
7.6.1	Dimensionnement du modèle	7.26
7.6.2	Construction du modèle	7.26
7.6.3	Dispositif de mesures et résultats	7.26
<u>8. Tests et résultats</u>		
8.1	Introduction	
8.1.1	Procédure des tests	8.1
8.1.2	Types de tests	8.2
8.1.3	Vitesse critique théorique	8.3
8.1.4	Présentation des résultats	8.5
8.2	Résultats des tests individuels	8.6
8.2.1	Test 1: pont hybride avec tablier métallique constant	8.7
8.2.2	Test 2: pont hybride complet	8.13
8.2.3	Test 6: pont hybride complet auto-ancré	8.19

	<u>Page</u>
8.3. Comparaison entre les tests	
8.3.1 Influence de la force de traînée sur le câblage	8.25
8.3.2 Influence de la rigidité et du poids propre de la portion haubanée du tablier	8.28
8.3.3 Influence de l'auto-ancrage des câbles principaux	8.40
8.4. Comparasion avec un pont suspendu et un pont haubané	
8.4.1 Introduction	8.45
8.4.2 Comparaisons	8.45
8.5. Conclusions	
8.5.1 Influence de la force de traînée sur le câblage	8.50
8.5.2 Influence de la rigidité de la portion haubanée du tablier	8.50
8.5.3 Influence de l'augmentation du poids propre de la portion haubanée du tablier	8.51
8.5.4 Influence de l'auto-ancrage des câbles principaux dans le tablier	8.52
8.5.5 Comparaison avec un pont suspendu et un pont haubané plan	8.52
8.5.6 Conclusions générales sur l'étude aérodynamique expérimentale des ponts hybrides	8.53

PARTIE 5: CONCLUSIONS

9. Conclusions générales

9.1. Résultats importants

9.1.1	Domaine de recherche	9.1
9.1.2	Méthodes analytiques et empiriques pour le calcul de la vitesse critique de flottement théorique	9.1
9.1.3	Résultats de l'étude du pont sur le fleuve Orénoque	9.2
9.1.4	Résultats de l'étude des ponts suspendus de grande portée	9.3
9.1.5	Résultats de l'étude des ponts hybrides de grande portée	9.4
9.1.6	Etude expérimentale en soufflerie	9.5

9.2. Recherche future

9.2.1	Chapitre 1: Introduction	9.7
9.2.2	Chapitre 2: Informatique	9.7
9.2.3	Chapitre 3: Vent	9.8
9.2.4	Chapitre 4: Vitesse critique de flottement théorique	9.8
9.2.5	Chapitre 5: Ponts suspendus	9.8
9.2.6	Chapitre 6: Ponts hybrides	9.9
9.2.7	Chapitre 7: Dimensionnement d'un modèle aéroélastique complet	9.9
9.2.8	Chapitre 8: Tests en soufflerie complémentaires	9.9
9.2.9	Autres domaines	9.10

Annexes	Page
A1 Théorie des déformations (<i>deflection theory</i>)	A.1
A2 Ponts suspendus, portée centrale chargée Calcul analytique non-linéaire géométrique	A.3
A3 Ponts suspendus, portée latérale chargée Calcul analytique non-linéaire géométrique	A.6
A4 Pont suspendu de 1 km de portée centrale Modes propres de vibration	A.8
A5 Pont hybride de 1 km de portée centrale Modes propres de vibration	A.11
Littérature	L.1-L.4
Curriculum Vitae	