

COLLABORATION ENTRE INGÉNIEURS ET ARCHITECTES SUR DEUX PROJETS DE PONTS HAUBANÉS

Emmanuel BOUCHON

Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA)

Laurent BARBIER, Christophe CHÉRON, Charles et Thomas LAVIGNE, Michel VIRLOGEUX

Architecte,

Architectes (Architecture et Ouvrages d'Art),

Consultant

1. INTRODUCTION

Les ponts à haubans offrent une solution élégante de franchissement dans de nombreuses circonstances et dans une large gamme de portées. A partir d'un principe de base très simple, ils autorisent une infinité de variations dans les formes et dans les dimensions. Une des particularités de ce type d'ouvrages est la très forte interaction qui existe entre tous les aspects de la conception : conception d'ensemble, conception des détails, méthodes de construction, fonctionnement structurel et, bien sûr, esthétique.

Le SETRA a eu l'occasion d'établir récemment les projets de deux ponts à haubans dans des sites très différents. Le pont de Puget-Théniers franchit le Var, fleuve relativement étroit mais au cours torrentiel, dans un site de moyenne montagne, sous des contraintes géométriques extrêmement sévères liées notamment à son implantation en zone urbaine. Le pont de Térénez franchit un fleuve côtier, l'Aulne, qui se jette dans la rade de Brest, à proximité de l'embouchure. La brèche est beaucoup plus large que dans le cas précédent, et on bénéficie a priori d'une plus grande latitude pour définir la géométrie de l'ouvrage. Cela ne rend d'ailleurs pas le problème plus simple, bien au contraire.

Dans les deux cas, les architectes ont été intégrés très en amont à l'équipe de projet et la collaboration qui s'en est suivie s'est révélée très féconde.

2. LE PONT DE PUGET-THENIERS

Le projet est établi pour le compte du département des Alpes Maritimes. Le nouvel ouvrage est destiné à remplacer un pont à voie unique construit en 1888.

2.1. Situation

La ville de Puget Théniers se trouve à 65 km au Nord-Ouest de Nice, au confluent des vallées du Var et de la Roudoule, à proximité de la frontière avec le département des Alpes de Haute Provence. Le Var coule d'ouest en est, il est longé en rive gauche par la voie des chemins de fer de Provence et par la route nationale 202. La plus grande partie de la ville est implantée en rive gauche du Var. Le franchissement du Var assure la liaison avec la route départementale 2211 A, qui constitue un itinéraire de substitution à la RN 202 pour rejoindre Nice. Ce franchissement dessert par ailleurs l'hôpital de Puget, situé en rive droite.

L'ouvrage actuel, le pont du Brouchier, est un pont métallique à poutres latérales en treillis, de 64 m de longueur, comportant deux piles dans le Var. Il porte une seule voie de circulation et un trottoir en encorbellement à l'extérieur de la poutre aval. Par son étroitesse, cet ouvrage n'est plus adapté au trafic actuel. De plus, la structure métallique est largement corrodée. Le Conseil général a donc décidé en 1999 de réaliser un nouvel ouvrage sans appui en rivière, portant deux voies de circulation et deux larges trottoirs.

L'emplacement du nouveau pont a été choisi 50 mètres à l'aval du pont actuel, dans l'axe de la route départementale 16 qui remonte la vallée de la Roudoule vers le nord. Cela permet d'améliorer en rive gauche le carrefour entre la RN 202, la RD 16 et la RD 2211A. En rive droite, il existe, au droit du nouveau

franchissement, une plate-forme naturelle qui facilite l'aménagement du carrefour entre la route de l'hôpital et la RD 2211A. Le nouvel ouvrage n'est donc pas seulement un franchissement routier mais un élément d'aménagement urbain, prolongement de la voirie de la ville.



Figure 1 - Plan de situation



Figure 2 - Le pont du Brouchier sur le Var

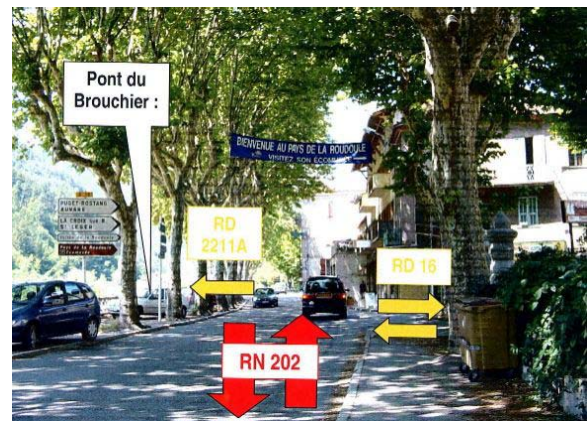


Figure 3 - La RN 202 au droit du projet ➤

2.2. Contraintes du franchissement

Dans l'axe du projet, le lit du Var a une largeur d'environ 65 mètres. La berge rive gauche est protégée par une digue et au sommet de la berge rive droite, un muret de soutènement maintient le chemin sur berge. Le Var est un fleuve de montagne très irrégulier aux crues parfois violentes et dévastatrices. Le sommet de la digue en rive gauche est situé 2 mètres au-dessus de la ligne d'eau centennale. Pour assurer l'écoulement des crues dans les meilleures conditions, il a été décidé que le nouveau pont n'aurait pas de piles en rivière. La commune de Puget-Théniers est située en zone de sismicité II, la plus élevée rencontrée en France métropolitaine. Pour l'application des règles de conception parasismique, l'ouvrage a été rangé en classe C, ce qui correspond à une accélération nominale de $3,0 \text{ m/s}^2$.

En rive gauche, l'ouvrage doit se raccorder à niveau avec la voie ferrée et la RN 202, ce niveau correspond à celui du sommet de la digue. En rive droite, la chaussée aboutit au niveau du futur carrefour entre la RD 2211A et la route de l'hôpital, environ 4 mètres plus haut ce qui impose une pente longitudinale de 4%. Le point le plus contraignant du profil en long est donc situé en rive gauche, où l'épaisseur disponible pour le tablier ne dépasse pas 1 mètre. Il faut noter également que la culée rive gauche doit s'inscrire dans l'emprise très exiguë délimitée par la voie de chemin de fer et le Var.



Figure 4 - Implantation du nouvel ouvrage

Enfin, sur le plan architectural, le maître d'ouvrage a souhaité que l'ouvrage constitue un signal remarquable à l'entrée du département et à proximité d'une voie de communication très fréquentée.

2.3. Choix du parti

Le maître d'ouvrage a confié les études de conception à une équipe associant le SETRA et l'architecte Laurent Barbier.

Pour franchir le lit du Var sans appui intermédiaire et avec une épaisseur réduite entre la surface de chaussée et l'intrados du tablier, il faut recourir soit à des poutres latérales, soit à une structure porteuse par dessus. Différentes solutions ont ainsi été explorées : des solutions à travée unique et des solutions à haubans à pylône unique implanté en rive droite..

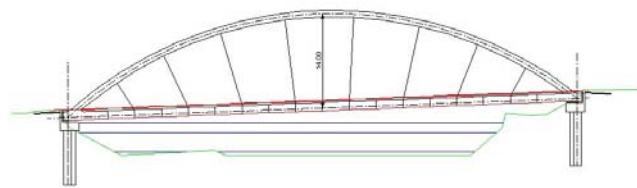


Figure 5 - Solution bow-string

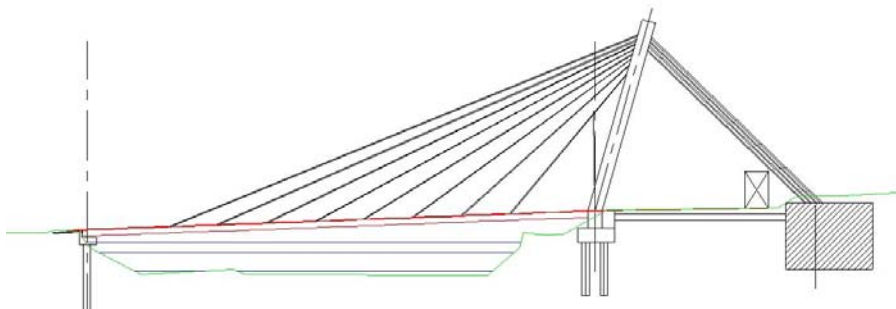


Figure 6 - Solution à haubans avec pylône incliné

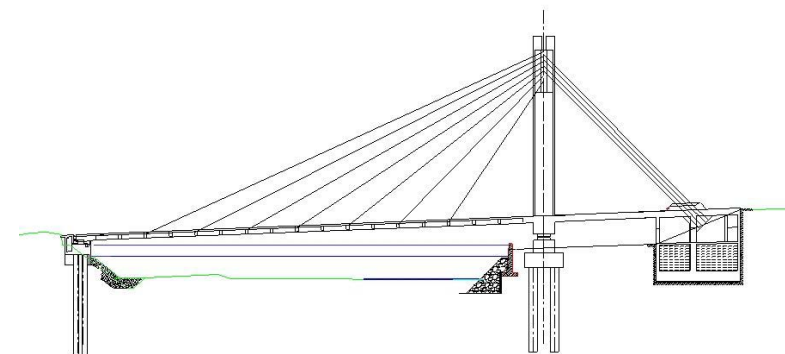


Figure 7 Solution retenue

inconvenient de taille : la réalisation du contrepoids exige l'ouverture d'une fouille importante et le maintien de la circulation sur la route départementale et sur la route de l'hôpital devient problématique pendant les travaux. De plus elle est assez nettement plus chère (de l'ordre de 40%) que les solutions à travée unique.

Il paraît donc préférable de placer le contrepoids entre le carrefour et le Var. Le pylône est vertical se situe alors au plus près de la berge. Le contrepoids est partiellement enterré et relié à la travée principale par une petite travée non haubanée. Les portées sont de 66,50 mètres et 16 mètres respectivement. Avec la longueur du contrepoids, 12 mètres, on atteint une longueur totale de 94,50 mètres. Cette structure est envisageable avec un tablier en béton précontraint ou avec un tablier en ossature mixte. Le coût estimé de

Pour les solutions à travée unique, la culée de rive droite est implantée au bord de la plate-forme, de manière à limiter son impact visuel : pas de mur de front, aménagement d'un perré sous le tablier en bordure du chemin sur berge. La portée atteint ainsi 76 mètres. Selon ce principe, ont été envisagées une structure à poutres latérales triangulées de type Warren et une structure de type bow-string.

Pour les solutions à haubans, il y a peu de recul en rive droite. Il faut prévoir l'équilibrage de la travée haubanée par un contrepoids qui peut être implanté soit avant, soit après le futur carrefour.

L'implantation après le carrefour correspond à une travée haubanée de 76 mètres de portée, identique à celle des travées indépendantes. Le contrepoids est totalement enterré et relié au tablier par un buton également enterré. Le pylône se trouve au bord de la plate-forme. Le carrefour entre la RD 2211A et la route de l'hôpital est aménagé sous les haubans de retenue. Le pylône doit être incliné vers l'arrière (côté contrepoids) afin de ménager une hauteur libre suffisante sous les haubans arrière. Cette solution présente un

ces solutions est environ 20 % plus élevé que celui de la solution à poutres latérales et 10% au-dessus du coût de la solution bow-string. Le coût de l'ouvrage reste modéré car il est possible de le construire par des méthodes assez simples. Le lit du Var est facilement accessible en dehors des périodes de crues. Le tablier est à faible hauteur au-dessus du lit. On peut donc utiliser un cintre général moyennant la réalisation de deux appuis provisoires. Cela introduit cependant une sujétion sur le planning : le tablier doit être réalisé hors périodes de crues.

C'est cette solution qu'a retenue le maître d'ouvrage car, pour un surcoût modéré, elle correspond le mieux à son objectif de créer un ouvrage remarquable à l'entrée du département. Il a de plus opté pour une solution à tablier en béton précontraint, plus mince que le tablier en ossature mixte et donc plus favorable pour l'écoulement des crues. Le tablier en béton précontraint permet aussi une transmission plus simple de l'effort normal vers le contrepoids.

2.4. Conception détaillée

En plein accord avec la maîtrise d'ouvrage, l'équipe de projet s'est fixé comme principaux objectifs de concevoir un ouvrage économique, aux formes les plus simples possibles. En effet, la faible portée (66,5 m) ne justifie pas une structure complexe et l'ouvrage doit présenter des lignes simples pour rester lisible, sous tous les angles de vision, en vue lointaine comme en vue rapprochée, partielle ou complète, dans un paysage à la fois montagneux et urbain.

De là résulte le choix de la section transversale. Dans la travée haubanée, le tablier est composé de deux nervures longitudinales reliées par des entretoises placées tous les 3,60 m et portant une dalle de 22 cm d'épaisseur. Cette solution offre à la fois finesse et légèreté : l'épaisseur totale de tablier est de 90 cm et son épaisseur moyenne équivalente ne dépasse pas 45 cm. Dans la travée de rive droite, la section se transforme en dalle pleine de même contour extérieur.

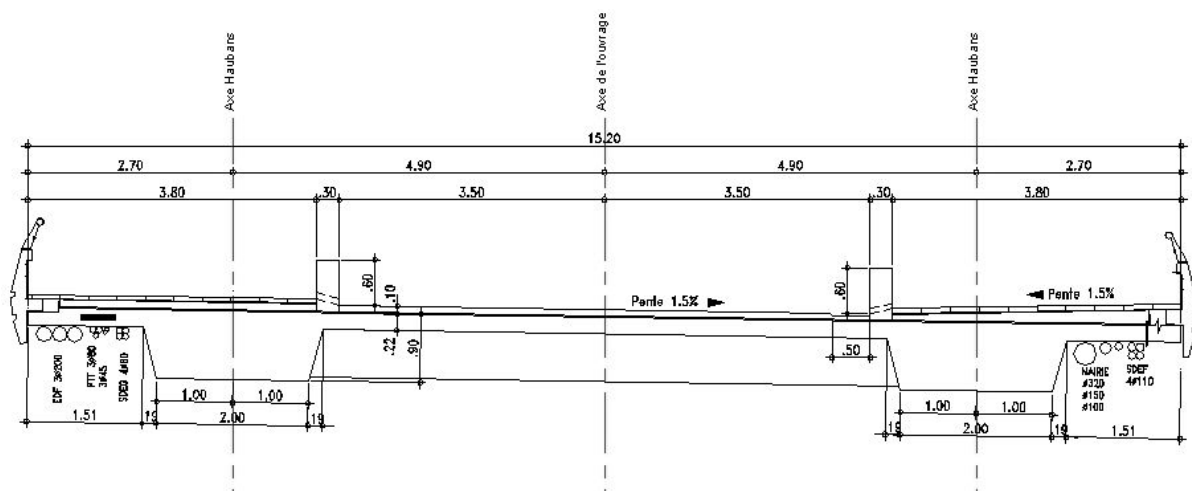


Figure 8 - Coupe transversale

Longitudinalement, le tablier est continu et vient s'encaster dans le contrepoids. Son déplacement est libre sur les deux autres appuis qui sont très rigides et ne pourraient absorber les déplacements imposés par l'action de la température ou par les déformations différées du béton. Les haubans de la grande travée sont ancrés tous les 7,20 mètres dans le tablier. La petite travée n'est évidemment pas haubanée et les haubans de retenue sont concentrés en un faisceau de câbles parallèles, inclinés à environ 45 degrés sur l'horizontale, ancrés directement dans le contrepoids.

Le haubannage est naturellement latéral, seule possibilité lorsqu'il n'y a pas de terre-plein central. Il y a sept paires de haubans dans la travée principale et quatre paires de haubans de retenue, de plus forte section. Par souci de simplicité, les haubans sont disposés dans deux plans verticaux et ancrés sur un pylône constitué de deux mâts verticaux encastrés dans le tablier dans le plan moyen des nervures longitudinales. Les plans de haubannage sont placés entre les voies routières et les trottoirs, de manière à limiter les portées

transversales. Cette disposition est favorable à tous les points de vue : esthétique, mécanique et économique. Sur le plan esthétique, des mâts de hauteur plutôt modeste, 25,50 mètres, situés à 10 mètres l'un de l'autre et en retrait des rives de tablier donnent des proportions beaucoup plus élancées et élégantes qu'avec un écartement de 13 ou 15 mètres. Sur le plan mécanique, les nervures travaillent de manière symétrique en faisant participer une plus grande largeur de dalle. Enfin, les fondations des pylônes sont plus compactes donc plus économiques.

On pourrait objecter que la solution retenue impose un tablier plus large qu'avec un pylône en forme de A ou de lyre dont les jambes passent à l'extérieur. C'est vrai mais le surcoût d'un élargissement du tablier est facilement compensé par la très grande simplicité d'exécution des mâts verticaux et par les économies de fondations. De plus, les pylônes en lyre ou en A introduisent des éléments obliques supplémentaires qui ne peuvent qu'apporter de la confusion dans les lignes de l'ouvrage. Ils apparaissent de plus mal proportionnés étant donné le rapport entre largeur de tablier et hauteur de pylône. Ces solutions ont donc été rapidement écartées. Le programme initial de l'ouvrage demandait des trottoirs larges de 1,50 mètre. Dans le projet final, l'élargissement imposé par l'encombrement transversal des mâts règne sur toute la longueur du tablier car un rétrécissement en dehors de la zone du pylône ne porterait que sur la dalle en encorbellement et ne procurerait pas d'économie significative. Cette surlargeur est finalement bienvenue car elle affirme le caractère urbain du pont en donnant de l'espace aux piétons.

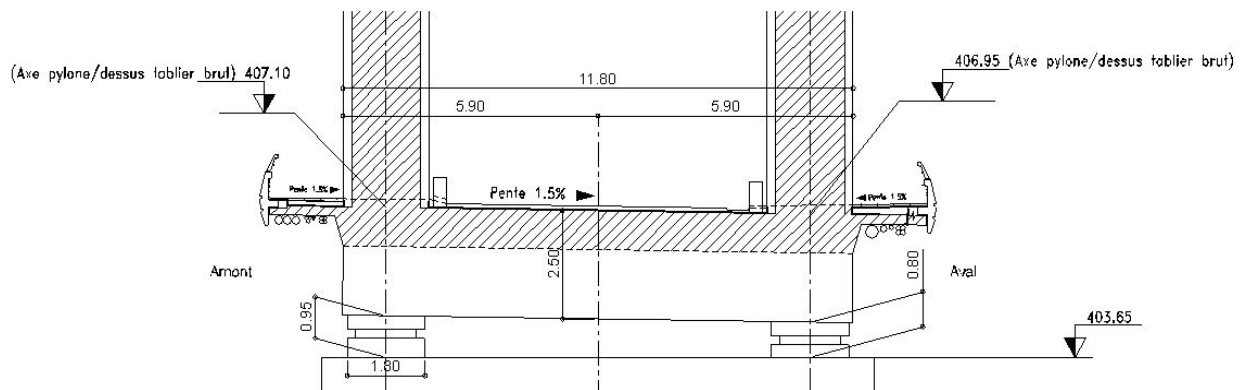


Figure 9 Coupe transversale et entretoise sur pylône

Les mâts ont une section constante, qui vise la pureté des lignes et la simplicité de construction. Leurs dimensions sont dictées par la résistance à la flexion transversale sous séisme et par l'encombrement des dispositifs d'ancrage.

Le niveau relativement élevé du séisme de calcul pouvait laisser craindre que les mâts verticaux ne soient pas capables de résister à la flexion transversale sans entretoise supérieure, ce qui aurait été esthétiquement malvenu.

Des calculs au séisme ont donc été lancés très en amont de manière à fixer le plus tôt possible les dimensions transversales car elles conditionnent une grande partie du projet. Une largeur de 2 mètres s'est avérée suffisante pour assurer la résistance en restant dans des limites raisonnables de densité de ferrailage.

Pour prendre un peu de marge, compte tenu des nombreuses incertitudes qui régnaient encore à ce stade de l'étude, les calculs de réponse au séisme ont été menés avec une section rectangulaire pleine sur toute la hauteur des mâts.

La section adoptée dans le projet final comporte de profondes cannelures qui allègent le mât sans réduire le bras de levier des aciers. De plus, toute la zone d'ancrage des haubans est creuse ce qui réduit considérablement la masse en mouvement en tête de mât et donc la flexion en pied. Les efforts restent malgré tout très importants et la section transversale courante du tablier aurait été trop mince pour assurer l'encastrement transversal des mâts. On a donc disposé une entretoise massive sous le tablier. Cette entretoise prolonge visuellement la forme des mâts. Dans le sens longitudinal, la dimension des mâts est imposée par l'encombrement de la pièce d'ancrage des haubans.

Selon une disposition aujourd'hui classique, tous les haubans sont ancrés en tête de mât dans une pièce en acier formée de deux flasques entre lesquels sont fixés les tubes d'ancrage par l'intermédiaire de tôles de transition. Une cheminée d'accès doit être ménagée entre les ancrages des haubans de la travée principale et ceux des haubans de retenue. La dimension longitudinale des flasques atteint ainsi environ 2,60 mètres.

La section finalement adoptée a une forme sensiblement ovale, inscrite dans un rectangle de 3 mètres de longueur et 2 mètres de largeur et marquée par quatre fortes cannelures. Les mâts sont ainsi relativement peu élancés (1/8,5) mais l'équipe de conception a préféré maintenir sur toute la hauteur les dimensions transversales nécessaires dans la zone d'ancrage plutôt que d'avoir une tête massive sur des fûts de section plus réduite. On privilégie ainsi la verticalité. Les parements courbes et les cannelures contribuent à affiner visuellement les mâts.

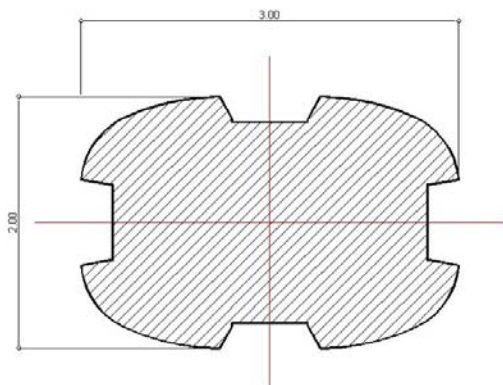


Figure 10 Coupe d'un mât

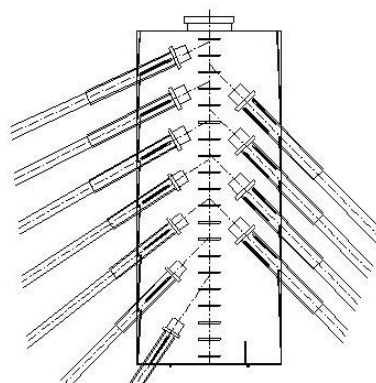


Figure 11 Ancrage des haubans



Figure 12 Mâts de haubanage

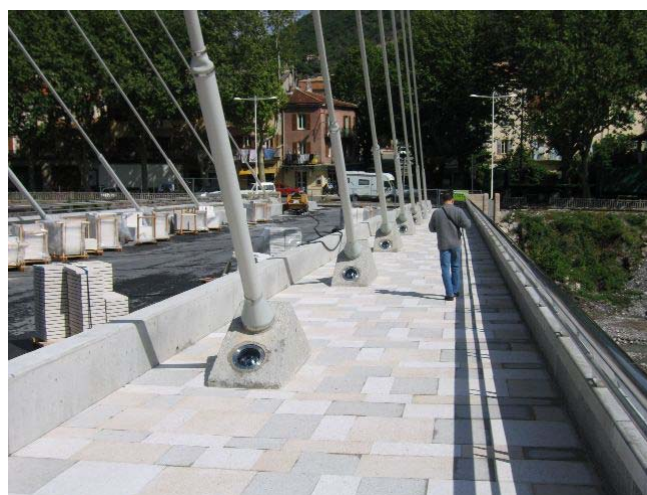


Figure 13 Revêtement des trottoirs

Les rives de tablier sont équipées de corniches en béton dont les formes et les dimensions répondent à l'élancement des mâts de haubanage. Ces corniches forment garde-corps et leur retombée vient masquer les réseaux fixés sous les encorbellements du tablier. Leur face extérieure est légèrement courbe et la ligne du tablier est soulignée par deux nervures en partie inférieure. Elles sont surmontées par une main courante en acier inoxydable.

Le caractère urbain du pont est souligné par le soin tout particulier apporté aux équipements, au choix des matériaux et au traitement des abords. Le revêtement des trottoirs-pistes cyclables est formé de dalles rectangulaires de différentes dimensions en béton coloré. Ce revêtement se prolonge au-delà de l'ouvrage en rive droite comme en rive gauche, marquant ainsi la continuité urbaine. L'ouvrage est mis en valeur par un éclairage dont la conception a été confiée à la société Lightec. Cet éclairage se compose principalement de projecteurs placés dans les bossages inférieurs d'ancrage des haubans et à la base des cannelures des mâts. Les premiers éclairent les haubans, les seconds créent un jeu d'ombre et de lumière dans les volumes des mâts.



Figure 14 Corniche en béton



Figure 15 Projecteurs en pied de pylône

2.5. La réalisation

Le projet prévoyait une construction en place sur cintre, avec la sujétion de devoir caler la construction de la travée principale hors période de crues. L'entreprise retenue, le groupement Razel-Cari, a proposé de construire l'ouvrage sur la berge rive droite, parallèlement au lit du Var et de le mettre en place par rotation autour de l'axe du mât de haubanage amont. Cette proposition, acceptée par le maître d'ouvrage a permis d'avoir une plus grande sécurité et un plus grande souplesse dans l'organisation du chantier. Quelques aménagements ont dû être apportés à la culée contrepoids. Elle a été réalisée en deux parties : une partie inférieure fixe et une partie supérieure mobile, liée au tablier. Le plan de découpe a été déterminé de manière à assurer l'équilibre par rapport au pylône pendant la rotation. Les deux parties ont ensuite été solidarisées par le bétonnage de cheminées verticales et par une poutre périphérique.



Figure 16a - Mise en place par rotation



Figure 16b - Mise en place par rotation



Figure 17 Aménagement en rive droite



Figure 18 - L'ouvrage terminé

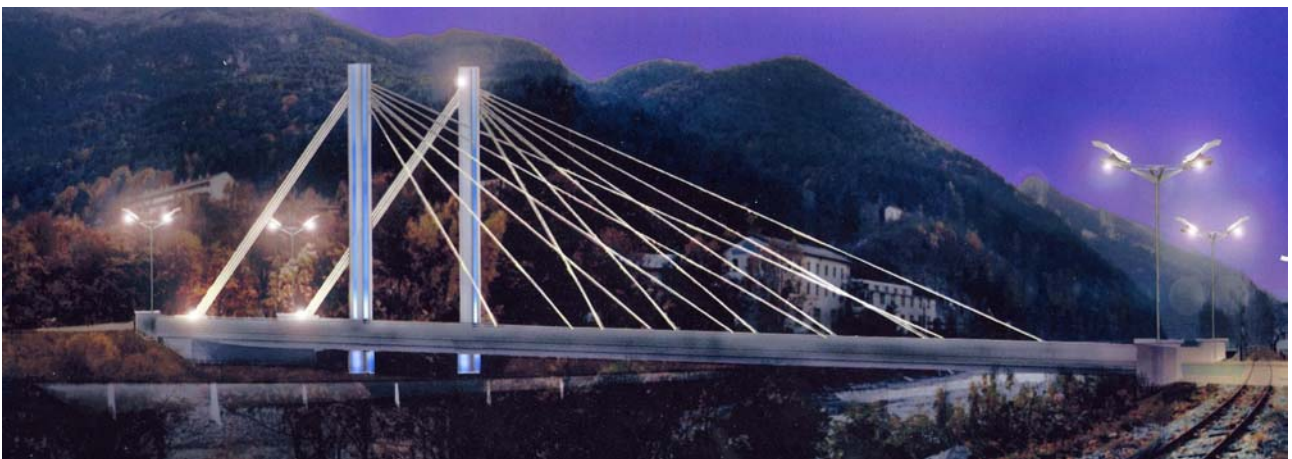


Figure 19 - Eclairage public et de mise en valeur

La construction est aujourd'hui achevée et la mise en service aura lieu prochainement.

Compte tenu des contraintes très fortes, la conception s'est assez vite orientée vers la solution définitive après le choix d'un pont à haubans par le maître d'ouvrage.

L'approche a été beaucoup plus longue pour le pont de Térénez.

3. LE PONT DE TEREZEZ

Le projet est établi pour le compte du département du Finistère. Comme pour le pont de Puget-Théniers, il s'agit de remplacer un pont ancien, en mauvais état et répondant mal aux exigences du trafic actuel.



Figure 20 - Situation



Figure 21 Le pont suspendu

3.1. Choix du site de franchissement

Le pont de Térénez franchit l'Aulne, fleuve côtier qui se jette dans la rade de Brest, à proximité de l'embouchure. Il porte la route départementale 971 et supporte le trafic routier entre le Nord du Finistère et la presqu'île de Crozon. Le seul autre accès routier à la presqu'île, en venant du nord, est situé plus en amont et allonge le trajet d'environ 25 km. Le franchissement se situe dans un espace naturel d'une grande qualité paysagère et environnementale, protégé à ce titre par de nombreuses réglementations françaises et européennes. L'Aulne a une largeur de 300 à 500 mètres et coule entre des versants boisés assez abrupts, surtout en rive droite, dont la crête se trouve à environ 75 mètres d'altitude.



Figure 22 - Vue panoramique du site

L'actuel pont de Térénez est un pont suspendu de 272 m de portée mis en service en 1951 (sur un projet du Service central d'études techniques, l'ancêtre du SETRA) en réutilisant les fondations et les appuis en maçonnerie d'un ouvrage plus ancien détruit pendant la seconde guerre mondiale. Les concepteurs du premier ouvrage, au début du 20^{ème} siècle, avaient naturellement choisi d'implanter l'ouvrage à l'endroit le plus étroit, correspondant à un léger rétrécissement de l'Aulne. Les accès routier composent au mieux avec le relief : sur chacune des rives de l'Aulne, la route descend à flanc de versant depuis l'amont et se raccorde au pont suspendu par un virage très serré à angle droit.

Les pylônes en béton armé du pont suspendu sont fortement atteints par l'alcali-réaction. Les premiers symptômes en ont été détectés dans les années 80. Une importante fissuration s'est développée (avec des ouvertures de fissures atteignant 5 mm) et la réaction est toujours active. Par ailleurs, d'autres parties de l'ouvrage, notamment les piles en maçonnerie et certaines zones de la charpente métallique, sont dans un état préoccupant. Après une première campagne d'injection des pylônes en 1992, le Conseil général du Finistère a donc pris en 1995 la décision de construire un nouvel ouvrage.

Cette opération donne l'occasion d'améliorer le tracé routier aux abords de l'ouvrage, pour plus de confort et de sécurité. En effet, les deux virages situés aux extrémités de l'ouvrage constituent des passages difficiles et relativement accidentogènes. Le profil en travers sera également étoffé. Le pont suspendu porte une chaussée de 6 mètres et deux trottoirs de 1 mètre. Sur le futur ouvrage, une chaussée de 7 mètres sera bordée par des trottoirs-pistes cyclables de 2,40 mètres qui permettront aux randonneurs, cyclistes ou cavaliers d'emprunter le pont dans de bien meilleures conditions qu'aujourd'hui.

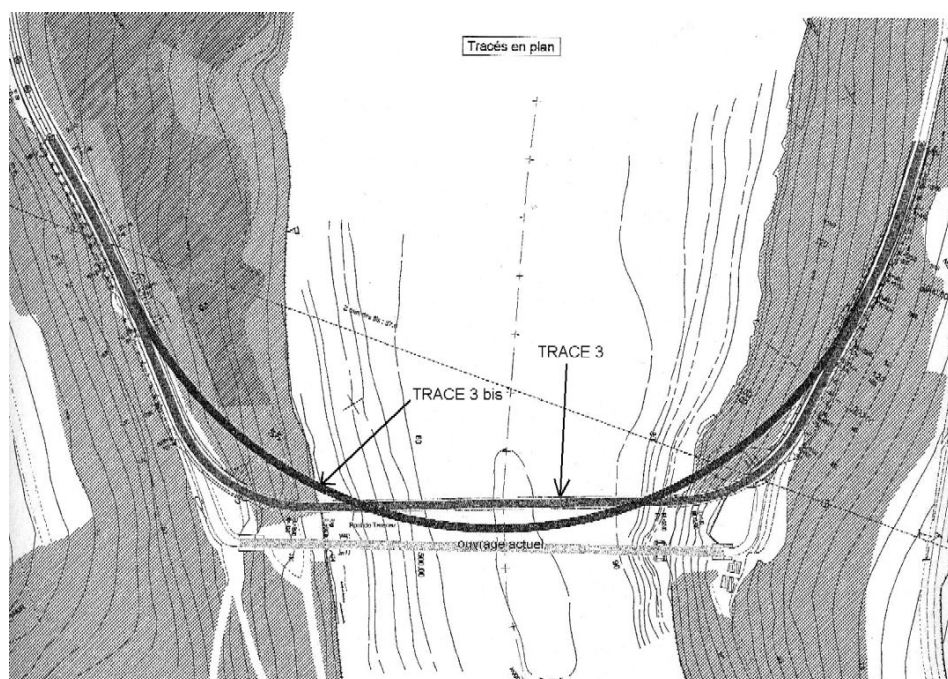


Figure 23 Les deux variantes de tracés

Différentes options de tracé neuf ont été étudiées et comparées sur les plans technique, économique et environnemental. Il a finalement été décidé, en 1998, de réutiliser la route existante et d'implanter le nouvel ouvrage à l'aval immédiat du pont suspendu. Parmi les solutions étudiées, c'est celle qui entraîne le minimum d'impacts nouveaux sur l'environnement, dispense de construire une nouvelle route et correspond à l'ouvrage le plus court. Deux variantes locales de tracé ont été retenues à ce stade : la première (tracé 3) comporte un alignement droit de 285 m et des courbes d'accès de 120 mètres de rayon, la seconde (tracé 3 bis) est en courbe de 345 mètres de rayon sur toute la longueur de l'ouvrage. Le tracé 3 bis est plus satisfaisant du point de vue routier mais il impose un ouvrage un peu plus long et, surtout, il est incompatible avec des structures à câbles sans appui en rivière. Ce sont sur ces bases qu'ont été lancées les études préliminaires.

3.2. Choix du tracé et du type d'ouvrage

Les études préliminaires ont été menées en équipe avec les architectes Charles Lavigne et Christophe Chéron (Architecture & ouvrages d'art). Dans une première étape, les objectifs étaient de choisir la variante de tracé et le type de structure.

Sur chaque tracé, trois solutions ont été dégagées pour illustrer l'éventail des solutions possibles. Toutes les solutions envisagées sur le tracé 3 bis ont un tablier en poutre continue dont la travée principale de 100 à 150 mètres de portée est centrée sur l'Aulne. Sur le tracé 3 sont possibles des solutions suspendues ou à haubans sans appui en rivière, et des solutions en béton précontraint similaires à celles envisagées sur le tracé 3 bis. A ce stade, l'incertitude majeure concerne la faisabilité d'appuis en rivière.

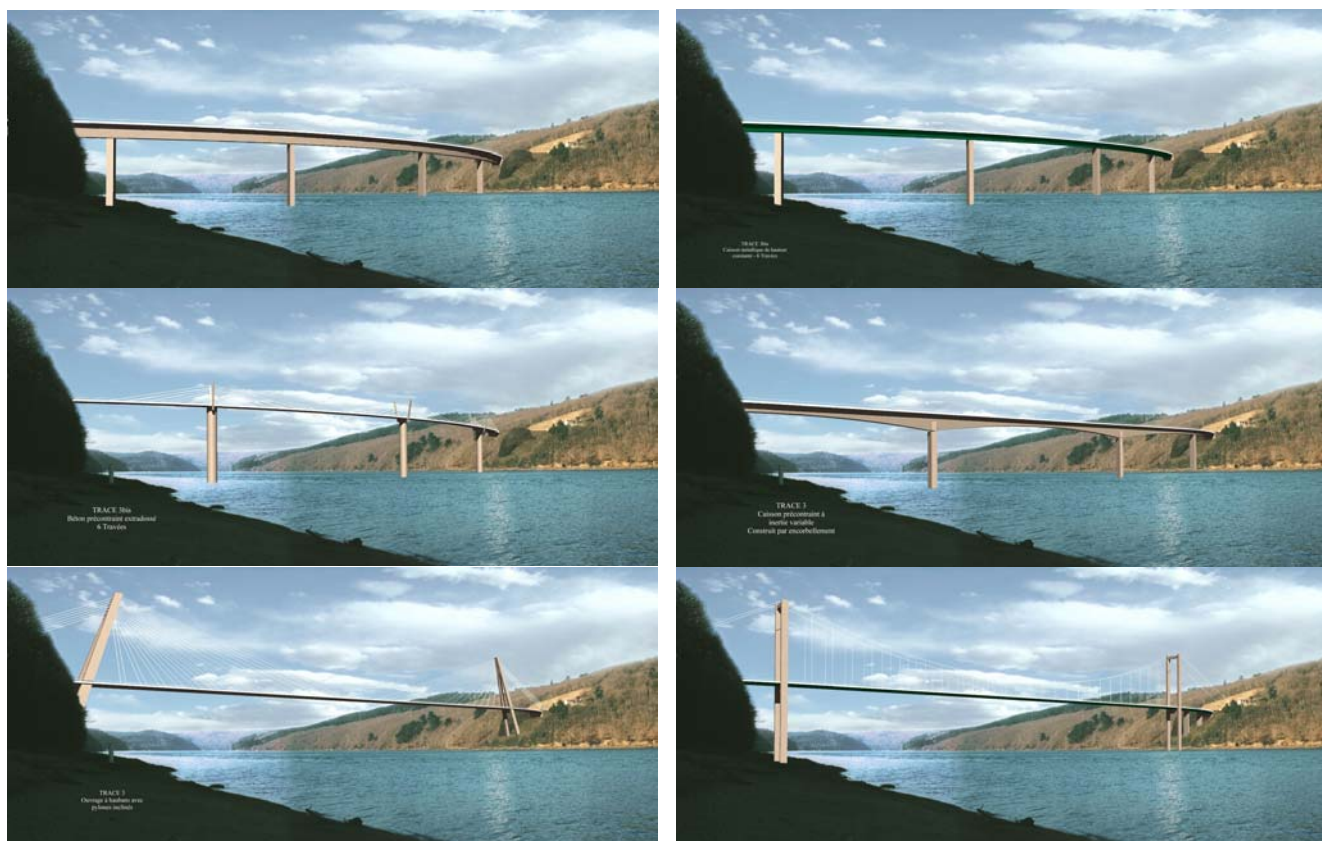


Figure 24 Les différentes solutions dégagées sur les deux tracés retenus

Au droit du franchissement, l'Aulne a environ 300 mètres de largeur et 15 mètres de profondeur au point le plus bas. Le niveau d'eau est directement sous l'influence des marées. Le marnage atteint couramment 6 mètres et peut aller jusqu'à 8 mètres. Sur le plan géotechnique, les sondages faits en rives ont démontré la possibilité de fonder des appuis sur les berges ou dans le fleuve à faible distance des berges. Par contre, les mesures par sismique réfraction dans le lit de l'Aulne ont mis en évidence une importante discontinuité du substratum rocheux, située approximativement au droit d'une des piles en eaux profondes des solutions classiques. La poursuite des études de solutions classiques aurait nécessité des investigations complémentaires lourdes et coûteuses au milieu de l'Aulne, de manière à déterminer précisément les implantations possibles d'appuis. Outre l'allongement inévitable de délai – de l'ordre d'un an – il était fort probable qu'il aurait fallu reconsidérer la distribution des portées, conduisant à une insertion moins satisfaisante dans la brèche : ouvrage non centré sur l'axe du cours d'eau, répartition irrégulière des travées. De plus, en toute hypothèse, le coût de réalisation de ces fondations en eaux profondes aurait été élevé. Le maître d'ouvrage a donc décidé d'abandonner les solutions classiques et de poursuivre les études d'une solution à haubans sur le tracé 3. Cette option a aussi l'avantage de mieux marquer la brèche, à l'image de l'ouvrage existant. Et il faut bien avouer qu'il aurait été un peu décevant de remplacer ce pont suspendu, le quatrième pont suspendu français par la portée, par un ouvrage plus banal et moins ambitieux.

3.3. Premier projet de pont à haubans

Différentes solutions à haubans à deux pylônes ont été esquissées sur le tracé 3, se distinguant par la portée de leur travée centrale et l'organisation du haubanage dans les travées latérales. On a même évoqué la possibilité d'incliner les pylônes vers l'Aulne pour les fonder sur la terre ferme sans allonger la portée centrale haubanée. Pour la suite de l'étude, on a retenu une travée centrale de 285 mètres, correspondant à la longueur de l'alignement droit, les pylônes sont verticaux et implantés à proximité des berges, dans des zones de faible profondeur et reconnues par les sondages. Les travées de rives sont relativement courtes avec 78 mètres de portée et des dispositions doivent être prévues pour éviter les soulèvements d'appuis.



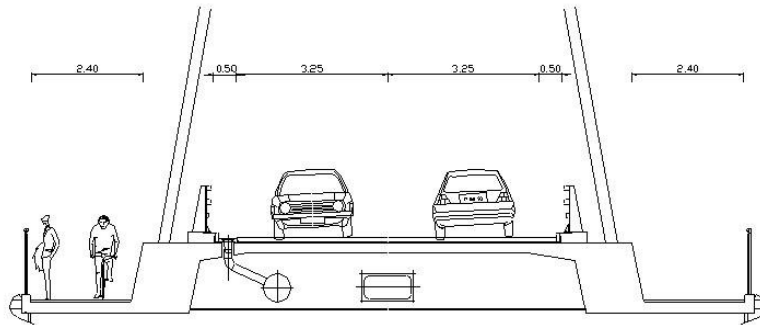
Figure 25 - Solution avec tablier non encastré et pylône en forme de lyre



Figure 26 - Solution avec tablier encastré et pylône en forme de A dissymétrique



La conception du tablier en béton précontraint s'inspire de celle du pont de Bourgogne à Chalon-sur-Saône, mis en service en 1992. La section transversale est de type « assiette renversée », composée de deux nervures longitudinales presque rectangulaires, reliées entre elles par la dalle supérieure et par des entretoises multiples. Les voies de circulation sont portées par cette dalle centrale tandis que les trottoirs et pistes cyclables sont portés par des dalles en encorbellement situées en contrebas, au niveau de la fibre inférieure des nervures. Une telle section possède l'inertie d'un petit caisson et la facilité de construction d'une section ouverte. Naturellement, le tablier est supporté par deux nappes de haubans ancrés dans les nervures longitudinales.



▲ Figure 27 - Coupe transversale courante

Figure 28 - Le pont de Bourgogne ►



Le tablier est construit par encorbellements successifs, avec une phase d'encorbellement symétrique par rapport au pylône, suivie du clavage en rive avec une partie de la travée latérale construite sur cintre puis la poursuite en surencorbellement jusqu'au clavage central. Il est également envisageable de construire les travées latérales entièrement sur cintre et de réserver la construction par encorbellements successifs à la travée centrale.

Plusieurs questions restaient ouvertes à cette étape du projet : possibilité d'un tablier en ossature mixte, nature de la liaison entre tablier et pylônes, haubannage des travées de rives. L'étude préliminaire donnait des pistes de réflexion sur ces questions, à l'exception de la variante en ossature mixte qui n'est pas abordée.

Pour la liaison entre tablier et pylônes, on a le choix entre l'encastrement et l'appui simple avec ou sans blocage des déplacements longitudinaux du tablier. Le plus simple avec un tablier en béton est l'encastrement. Il simplifie la construction et les dispositifs provisoires de stabilisation. Il élimine toutes les sujétions d'entretien d'appareils d'appui. Cependant, les pylônes doivent pouvoir supporter les déplacements longitudinaux imposés par les effets du retrait, du fluage et de la température dans le tablier. Le choix effectué a des conséquences importantes sur la structure et la forme des pylônes. Dans le cas de l'appui simple, les mâts des pylônes doivent passer l'extérieur du tablier. Dans le cas de l'encastrement, les mâts peuvent traverser le tablier dans le plan des nervures. Deux formes de pylônes très différentes ont été dessinées pour illustrer ces deux possibilités. Avec l'appui simple, on a représenté un pylône en forme de lyre, similaire à ceux du pont de Beaucaire-Tarascon : les haubans sont dans deux plans verticaux et les deux mâts convergent sous le tablier pour former un fût unique. Une entretoise haute (au niveau de l'ancrage des haubans) et une entretoise basse (sur laquelle s'appuie le tablier) assurent l'équilibre des efforts. Pour l'encastrement on a choisi un pylône en forme de V renversé dont les deux branches conservent leur inclinaison sous le tablier. Les trottoirs passent à l'extérieur, comme sur le pont de Puget-Théniers. Cependant, l'élargissement reste local car avec une travée de 285 mètres construite par encorbellements successifs, il importe de ne pas alourdir inconsidérément le tablier. Et la largeur des trottoirs en section courante reste très confortable.

Le haubannage des travées de rives doit tenir compte de leur courbure et de leur faible longueur. Pour éviter les soulèvements d'appui, on a choisi le principe d'un contrepoids. Ce n'est pas la solution la plus économique mais c'est la plus sûre. On peut en effet avoir en la pesanteur une confiance aveugle. La masse du contrepoids nécessaire à chaque extrémité a été évaluée à 2400 tonnes.

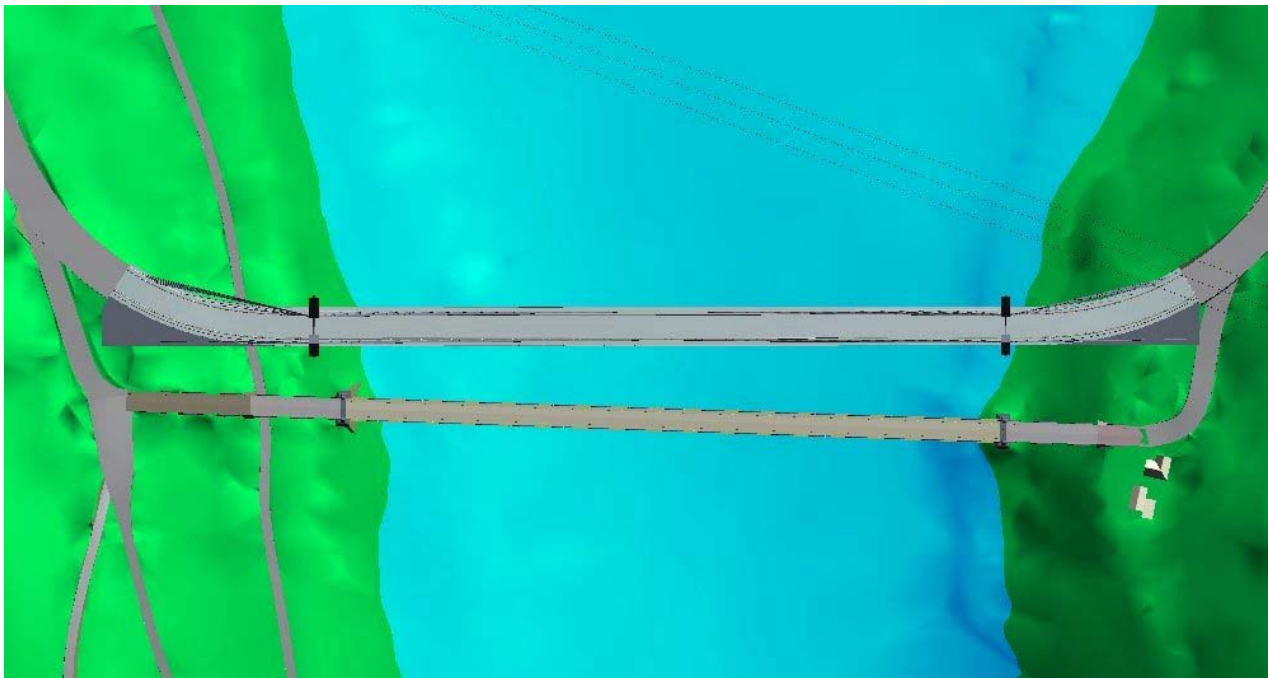


Figure 29 Tracé en plan du nouveau (au-dessus) et de l'ancien pont

On a envisagé des solutions avec ou sans haubannage des travées de rives. Dans le premier cas, la nappe de haubans extérieure à la courbe risque d'entrer en conflit avec le gabarit routier. Pour éviter cela, on maintient ces haubans dans le même plan que ceux de la travée centrale et on élargit la travée de rive, ce qui est propice à la réalisation d'un contrepoids. En zone courante, les haubans conservent le même espacement qu'en travée centrale et on concentre les ancrages des haubans de retenue, au nombre d'une dizaine, vers la culée. Les haubans de la nappe intérieure suivent la courbure de la voie et induisent de ce fait des efforts transversaux en tête de pylônes. C'est la raison pour laquelle on a envisagé une forme de pylône dissymétrique, avec un jambe verticale côté extérieur à la courbure. Si la travée de rive n'est pas haubanée, elle est portée par des appuis intermédiaires. On peut placer le contrepoids dans le prolongement de l'alignement droit de la travée centrale et l'ensemble des haubans de retenue converge vers ce contrepoids. Les efforts horizontaux longitudinaux sont équilibrés par un buton, lié ou non à la travée de rive.

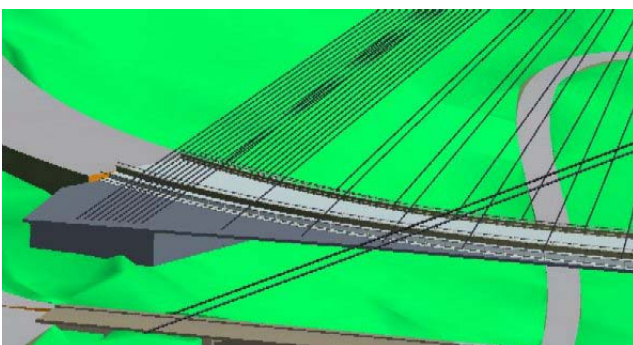
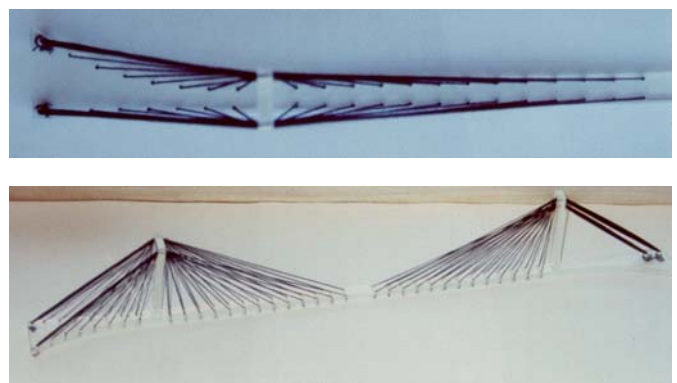


Figure 30 - Elargissement du tablier et massif contrepoids en rive gauche



*Figure 31 - Organisation des haubans.
En haut : vue de dessus en rive gauche.
En bas : avec ou sans haubannage des travées latérales*

Sur les plans structurel et constructif, la faisabilité du projet était assurée et les études auraient pu se poursuivre sur les bases ainsi définies. Cependant le confort routier et l'inscription dans le site restaient peu satisfaisants à cause de la forte courbure des travées de rives.

3.4. Evolution du tracé et amélioration du projet

En 2000, Michel Virlogeux a rejoint l'équipe de projet. Après analyse de l'ensemble des études effectuées jusqu'alors, il a approuvé les choix de section transversale de principe de haubannage mais il a montré peu d'enthousiasme pour le traitement des travées de rives. Il a cherché à améliorer l'organisation du haubannage dans ces travées latérales pour conclure que rien n'était totalement satisfaisant et a alors proposé de s'orienter vers un tracé courbe dans la travée centrale. Cela permettait d'allonger les travées de rives tout en augmentant leur rayon de courbure. On pouvait ainsi espérer résoudre de manière plus élégante les problèmes rencontrés. Le nouveau tracé comporte un rayon de 800 mètres pour la travée centrale et des rayons de 200 mètres pour les travées de rives. La portée centrale de 285 mètres est conservée et les travées de rives atteignent 115 mètres (avec éventuellement une ou plusieurs pilettes intermédiaires) contre 78 mètres auparavant. La taille du contrepoids peut ainsi être très largement réduite.

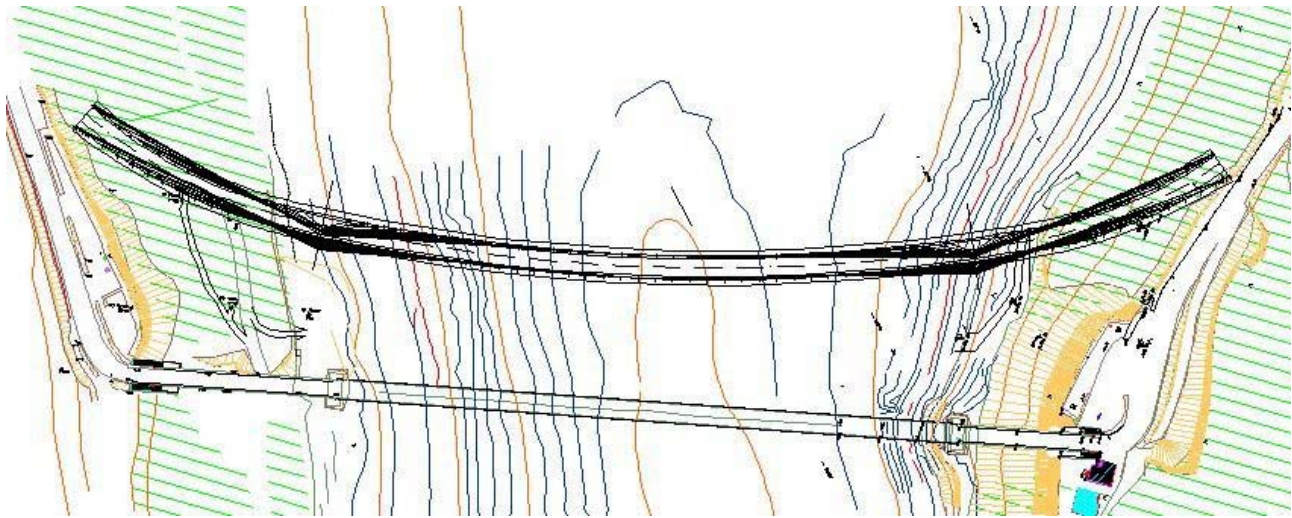


Figure 32 - Tracé courbe

La première question qui conditionne la faisabilité de ce tracé est l'intensité des moments de flexion d'axe vertical induits dans le tablier par la courbure. En effet, les composantes horizontales des tensions de haubans ne sont pas centrées sur l'axe du tablier et provoquent donc une flexion dans le plan horizontal. Une évaluation préliminaire a montré que les efforts et les déformations de flexion demeuraient acceptables.

L'élaboration du projet s'est alors poursuivie sur ce nouveau tracé. La courbure introduite en travée centrale a des conséquences sur tous les aspects du projet qui est de ce fait rendu beaucoup plus complexe. Le nœud de toutes les difficultés du projet se trouve dans la définition des pylônes, qui interagissent avec tout le reste de la structure de manière bien plus étroite que si le tracé était rectiligne. La conception des pylônes est influencée par des considérations géométriques (respect des gabarits routiers et forme des travées de rives), structurelles (efforts horizontaux dans les pylônes et le tablier) et esthétiques.

A ce stade on a éliminé l'option des pylônes en forme de lyre et le tablier en appui simple. Un pylône en V renversé est mieux adapté à la reprise d'efforts horizontaux transversaux appliqués par les haubans, qui peuvent se décomposer en efforts normaux dans les jambes. Du point de vue architectural, cette forme se marie mieux avec la courbure du tablier.

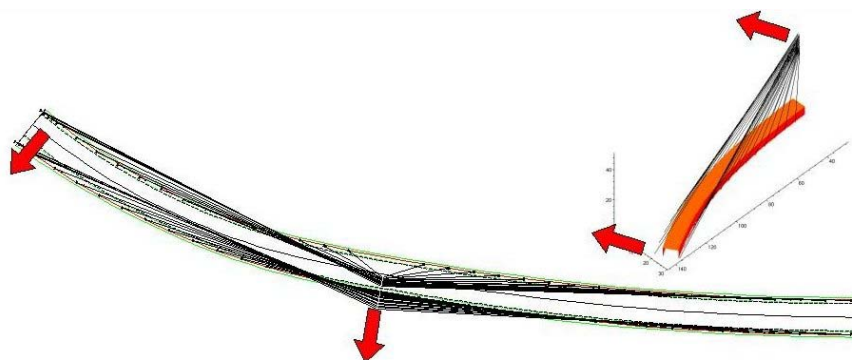


Figure 33 - Disposition des haubans pour respecter le gabarit

L'augmentation du rayon de courbure des travées de rives améliore les conditions de respect du gabarit. Néanmoins, il reste nécessaire d'élargir progressivement le tablier depuis le pylône jusqu'à la culée. Pour limiter cet élargissement, il faut déporter vers l'extérieur de la courbe les points d'attache des haubans de la nappe extérieure en tête de pylône. Ce sont les haubans les plus longs, donc ancrés le plus haut dans les pylônes, qui sont les plus contraignants pour le gabarit. Il peut donc être intéressant d'avoir un déport qui croît avec la longueur des haubans et l'altitude de leur point d'attache. Cette réflexion a amené à concevoir successivement deux types de pylônes : un pylône symétrique avec une tête massive et une zone d'ancrage s'élargissant vers le haut, puis un pylône dissymétrique avec une jambe verticale, côté extérieur et l'autre inclinée, et une zone d'ancrage courbe pour les haubans amont (extérieurs à la courbe). L'élargissement en travée de rive est de la sorte limité à 2 mètres, contre plus de 10 mètres avec le tracé rectiligne.

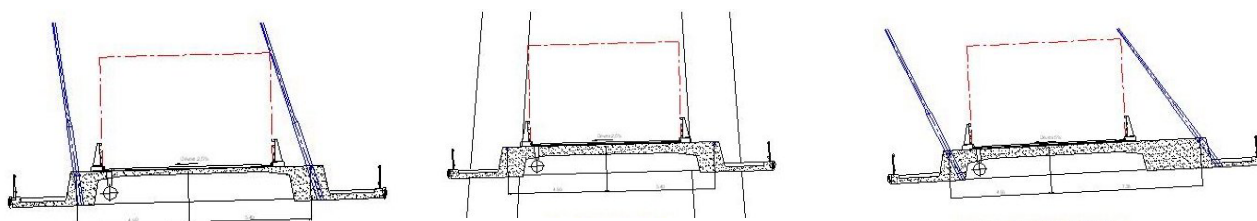


Figure 34 - Coupes transversales en travée centrale, au droit d'un pylône et en extrémité

La solution de pylône dissymétrique apparaissait très satisfaisante, mais son fonctionnement mécanique ne l'était pas. En effet, les jambes de pylône étaient soumises à d'importants moments de flexion dans leur partie située sous le tablier. Cela a été mis en évidence par les premiers calculs de structure faits sur cette solution et cela s'explique très bien par des considérations de statique. Le pylône est soumis à des efforts dont la résultante générale est verticale : il s'agit du poids du tablier transmis pour l'essentiel par les haubans. Mais les haubans apportent aussi en tête de pylône, du fait de la courbure, une composante horizontale transversale, dirigée vers l'intérieur de la courbe. Cette composante est égale et opposée à celle appliquée par le tablier. De ce fait, l'effort appliqué en tête se décompose en efforts normaux dans les deux jambes du pylône au-dessus du tablier. La presque totalité de l'effort normal passe dans la jambe inclinée car il se trouve que le centre de gravité du fléau haubané passe par le point de jonction entre la jambe intérieure du pylône et le tablier. Sous le tablier, la résultante devient verticale et engendre donc d'importantes flexions dans le portique formé par les deux jambes et l'entretoise du tablier. Le problème est le même avec un pylône symétrique à jambes inclinées.

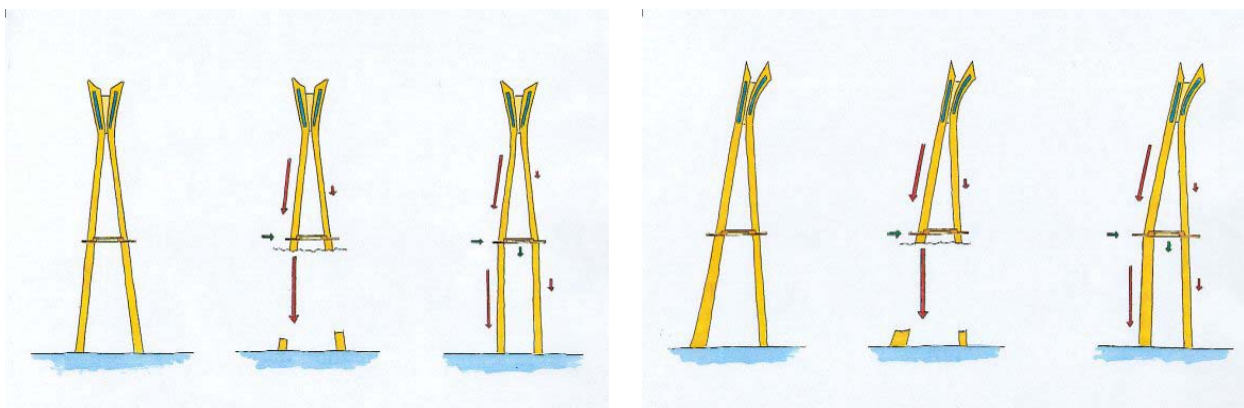


Figure 35 Cheminement des efforts dans les pylônes à jambes inclinées



Figure 36 - Pylône dissymétrique

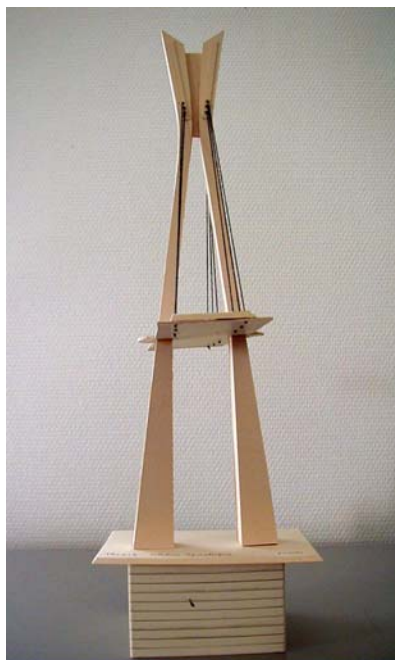


Figure 37 - Pylône symétrique avec jambes épaissies

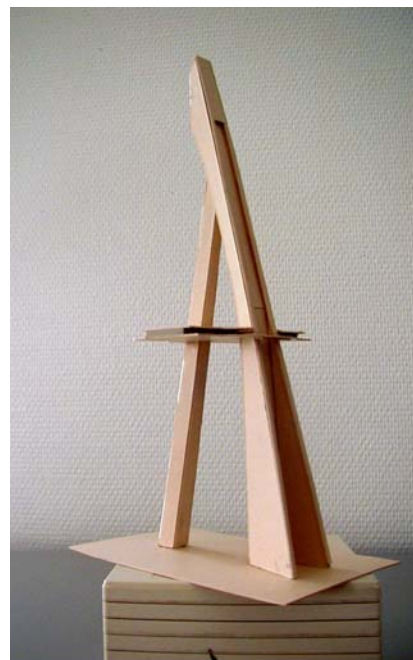


Figure 38 - Evolution du pylône dissymétrique

De très nombreuses solutions ont alors été esquissées pour résoudre ce problème. La façon la plus immédiate de supprimer les flexions parasites consiste à rendre les deux jambes verticales sous le tablier. Mais le résultat est plutôt malheureux sur le plan esthétique. On peut l'améliorer en donnant une section variable à la jambe interne de manière à rendre sa ligne moyenne verticale tout en préservant la continuité de lignes au passage du tablier. Si l'on ne redresse pas totalement la jambe intérieure, il faut incliner de façon importante la jambe extérieure vers l'extérieur. Une solution très efficace mécaniquement consiste à ajouter une diagonale entre les deux jambes, la structure devient triangulée et fonctionne alors essentiellement en effort normal. Mais c'est assez désastreux sur le plan esthétique. Cependant, en examinant la distribution des efforts dans ce portique avec diagonale, on s'aperçoit que la jambe extérieure est très peu chargée et que la descente de charge se répartit à peu près également entre la jambe intérieure et la diagonale, très peu fléchies. La jambe extérieure n'a donc pas de grande utilité mécanique et il suffit de la supprimer pour obtenir le pylône à mât unique en forme de λ finalement retenu. Le travail ne s'est évidemment pas arrêté là. Il a ensuite fallu une étude approfondie des formes et du fonctionnement de la structure pour aboutir au projet final.

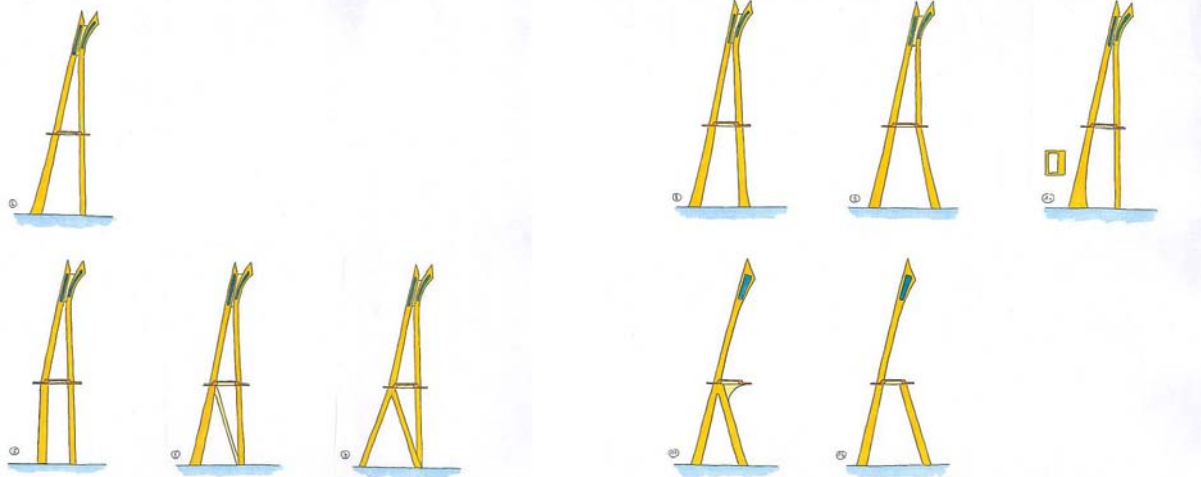


Figure 39 - Différentes formes de pylônes envisagées

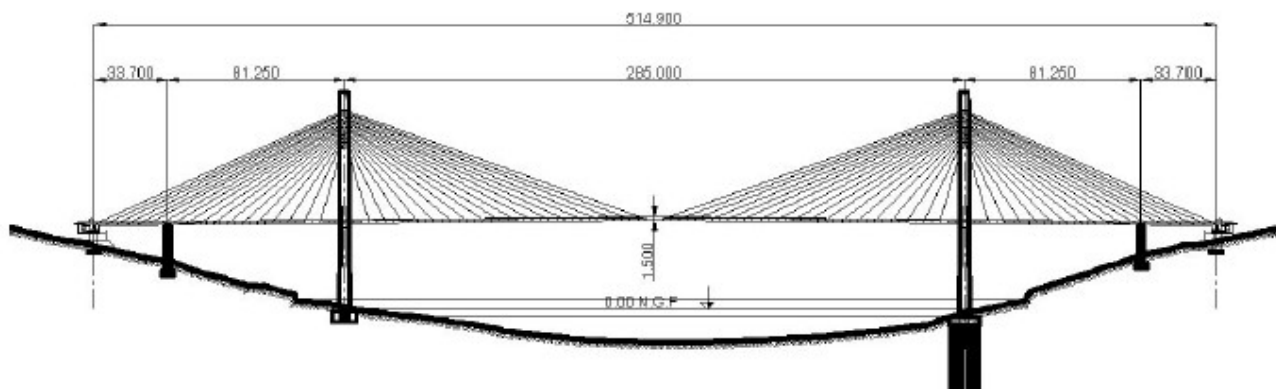
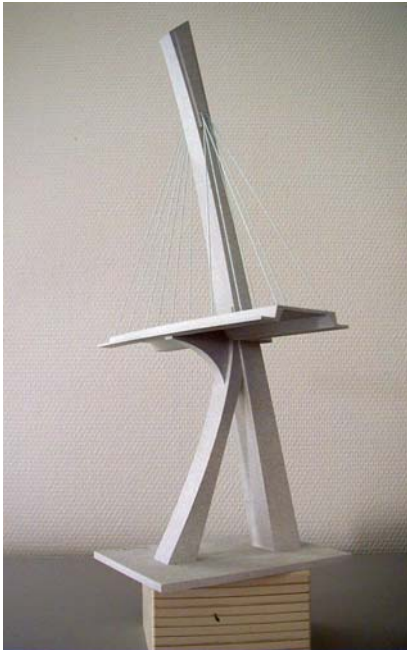


Figure 40 - Coupe longitudinale

Dans le même temps, on a figé le schéma statique longitudinal. La répartition définitive des portées est : 33,70 m, 81,25 m, 285,00 m, 81,25 m, 33,70 m. La pilette placée en travée de rive renforce l'efficacité des haubans de retenue. La section transversale du tablier, haute de 1,50 m se transforme en dalle pleine sur une longueur d'environ 40 mètres à partir de la culée. Cela suffit presque à empêcher les soulèvements d'appuis mais il faut néanmoins ajouter une retombée pour compléter le lest sur culée. Les nervures s'élargissent progressivement en travée de rive depuis le pylône jusqu'à la partie en dalle pleine. La répartition des haubans en travée de rive a été améliorée. Au départ, les haubans étaient régulièrement espacés de la même manière qu'en travée centrale et les haubans de retenue, au nombre de cinq paires, étaient concentrés vers la culée, avec un espacement minimal (1,50 m à 2,00 m). Dans le projet final, l'espacement des haubans se réduit progressivement et régulièrement du pylône jusqu'à la culée. Ils passent de 7,50 m à 4,70 m par pas de 0,175 m. Avec cette disposition, compte tenu de la répartition du poids du tablier, les moments de flexion dans le tablier et dans les pylônes sont pratiquement nuls sous charges permanentes. Ce dernier exemple illustre le soin avec lequel tous les détails ont pu être traités dans ce projet. Car la répartition finale des haubans est non seulement pertinente sur le plan structurel mais elle est aussi très favorable esthétiquement en supprimant l'accumulation des haubans de retenue.



Figures 41 et 42 - Pylône "lambda" et image de synthèse de l'ouvrage

Le projet final ne résulte donc pas du choix arbitraire d'une forme originale mais découle de manière logique et naturelle (mais faire émerger le naturel demande beaucoup de travail) des contraintes du franchissement et du fonctionnement de la structure.

L'appel d'offres a été lancé en avril 2005 pour une remise des plis en juillet. Si tout se passe bien les travaux devraient démarrer en 2006.



Figure 42 - Photomontage

4. CONCLUSION

Dans les deux projets évoqués par cet article, le principe du pont à haubans s'est imposé après une analyse approfondie de l'ensemble des contraintes du site et l'examen d'un large éventail de solutions – et aussi, il faut le dire, par la volonté du maître d'ouvrage.

Ces deux cas illustrent bien ce qui à notre sens constitue une collaboration réussie entre ingénieurs et architectes.

Tout au long des différentes étapes de la conception, depuis le choix des options principales jusqu'à l'affinage progressif des formes et des détails, un dialogue permanent s'est établi. Ce dialogue est possible et fructueux lorsque chacun fait l'effort de comprendre et s'approprier les problèmes de l'autre. On a peu de chance d'arriver à un résultat satisfaisant si l'ingénieur ne se préoccupe que de structure et l'architecte que d'esthétique. Il n'y a pas de dialogue possible si l'ingénieur se retranche derrière son savoir et les résultats de ses calculs ou derrière son incompétence en matière d'architecture. Il en va de même si l'architecte ne se soucie pas des conséquences structurelles et constructives de ce qu'il propose.

L'ingénieur doit avoir et exprimer une sensibilité esthétique tandis que l'architecte doit connaître et comprendre les impératifs du fonctionnement d'une structure et les processus constructifs. Mais le dialogue et l'écoute n'excluent pas l'exigence sans laquelle on se contentera de solutions de compromis, sans aller au bout de la logique du projet.

Chaque membre de l'équipe doit être exigeant envers lui-même, envers les autres et envers la qualité du projet. Le premier projet de pont à haubans de Terenez, sur le tracé avec alignement droit, est un exemple de solution de compromis, tout à fait viable mais qui reste inaboutie. De même, pour le pont de Puget, on aurait très bien pu se contenter d'un pylône purement fonctionnel, avec une tête massive et une entretoise haute entre les mâts pour mieux résister à l'effet du séisme ; ce faisant on aurait considérablement appauvri l'impact de l'ouvrage dans le site. Il va sans dire que tout cela demande beaucoup de travail et qu'on ne peut arriver à un résultat qui approche la perfection qu'en remettant autant de fois que nécessaire l'ouvrage sur le métier. Evidemment, cela demande du temps et de l'argent.

Dans les ponts à haubans qui sont des ouvrages très techniques, où le comportement de la structure commande toute la conception, il y a manifestement des options qui sont plus du ressort de l'ingénieur et d'autres de l'architecte. Mais ce sont aussi des ouvrages où les concepteurs peuvent agir sur un nombre quasi infini de degrés de liberté. Tous les choix ont un volet structurel et un volet architectural. Si le dernier mot doit revenir à l'ingénieur – car c'est sur lui que repose la sécurité de l'ouvrage – c'est la confrontation des points de vue et la discussion entre les membres de l'équipe qui permettent de converger pas à pas vers un projet de qualité. Et, dans le projet final, il n'est pas toujours facile de distinguer ce qu'on doit à l'un plus qu'à l'autre. Ce qui est certain, c'est qu'ils n'y seraient jamais arrivés l'un sans l'autre.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Design of the new bridge over the Var river in Puget-Théniers – Philippe Vion et divers auteurs – Symposium **fib** 2004 Avignon
- [2] Le projet du nouveau pont sur le Var à Puget-Théniers – Philippe Vion – Bulletin ouvrages d'art du SETRA, n° 48 avril 2005
- [3] Design of the Terenez curved cable-stayed bridge – Michel Virlogeux et divers auteurs – Symposium **fib** 2004 Avignon
- [4] Le projet du nouveau pont de Terenez – Florent Imberty – Bulletin ouvrages d'art du SETRA, n° 45 avril 2004.