

Séance du 2 mai 2023

Conférence-débat de Michel Virlogeux
avec Yves Malier

LES DÉFIS DE LA CONSTRUCTION DES GRANDS PONTS

Un des plus grands concepteurs mondiaux de ponts, l'ingénieur des Ponts Michel Virlogeux, raconte pas à pas une de ses dernières aventures : la conception et la construction du troisième grand pont suspendu sur le Bosphore, réalisé entre 2012 et 2016. Relier l'Europe à l'Asie sur une zone sismique et venteuse, enjamber un détroit sans entraver la navigation, réunir sur un unique tablier deux fois quatre voies routières et deux voies ferroviaires, quand tous les ponts du monde les répartissent sur deux niveaux... Concevoir ce projet en neuf semaines à peine, le réaliser en 4 ans et demi, en priorisant l'esthétique comme l'exige la Turquie, son commanditaire : le 3^e pont sur le Bosphore cumule tous les défis. Aux dilemmes de conception résolus à quatre ou cinq ingénieurs (allonger la portée du pont ou construire un pylône au milieu du détroit ? où placer les ancrages des haubans ? comment équilibrer les forces longitudinales en l'absence de blocage ?) succèdent les problèmes pratiques de construction impliquant une pléthore d'acteurs (coffrages glissants comme l'exigent les Turcs ? auto-grimpants selon les vœux des concepteurs ?). Précédée d'une introduction par son ami et complice Yves Malier, grand spécialiste du béton, cette conférence en forme de récit par le créateur du Pont de Normandie et du Viaduc de Millau démontre qu'il n'est de grand ouvrage sans souci du détail au service d'une vision.

Michel Virlogeux. Polytechnicien, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, docteur ingénieur de l'UPMC. Occupe plusieurs postes à responsabilités pour les grands ouvrages au SETRA, pour la conception et l'exécution de très nombreux ponts en France et à l'étranger, et pour le développement de nouvelles techniques - ponts à haubans, ponts en ossature mixte acier-béton, avant de devenir ingénieur consultant. Professeur à l'École nationale des ponts et chaussées, à l'École spéciale des travaux publics, au Centre des hautes études de la construction. Président de la FIP, puis de la FIB. Concepteur du Pont de Normandie, classé comme l'un des plus remarquables du siècle par la revue *Bridge*. Membre fondateur de l'Académie des technologies, membre associé de l'Académie des sciences ainsi que des académies d'ingénierie britannique, américaine, indienne.

Yves Malier. Diplômé de l'ENSET et docteur ès sciences physiques de l'UPMC. Professeur des Universités, notamment titulaire de la Chaire « Béton armé et béton précontraint » à l'École nationale des ponts et chaussées. Ancien directeur de l'ENS Cachan et du Centre national de l'enseignement technique, ancien conseiller scientifique de grands groupes (Lafarge, Bouygues), et créateur de l'École française du béton. Occupe plusieurs fonctions ministérielles pour mener des projets nationaux de recherche : « Voies nouvelles du Matériau Béton », « Bétons auto-plaçants ». Engagé dans le développement d'écoles normales supérieures technologiques dans une quinzaine de pays étrangers (Afrique, Asie du Sud-Est...). Aujourd'hui membre de l'Académie des technologies et conseil scientifique aux entreprises.

Naissance d'un pont : le 3^e pont sur le Bosphore
Débats

2
5

Introduction par Yves Malier

Pour toutes les civilisations et toutes les époques, le pont est un symbole d'échange, de fraternité, de rapprochement culturel, de relations économiques. En témoigne sa présence sur tous les billets de notre monnaie, l'euro, et sur nombre de timbres-poste dans plus de 150 pays. On peut y reconnaître quelques-uns des 250 ponts qui, dans le monde entier, portent la signature de Michel Virlogeux, digne successeur de Gustave Eiffel et Eugène Freyssinet. Ingénieur et scientifique, Michel n'est pas seulement le créateur de grandes innovations de rupture. Artiste de grand talent, il exige aussi pour ses ponts beauté et harmonie, travaillant en étroite collaboration avec les plus grands architectes d'aujourd'hui. Depuis toujours, des trophées internationaux couronnent les records de hauteur, de longueur, de portée¹, mais aussi la perfection esthétique des ponts. Michel Virlogeux compte à son actif près de quarante nominations, ce qui fait de lui aujourd'hui l'ingénieur français de grands projets le plus connu au monde. Aussi bien cultive-t-il l'exceptionnel depuis ses débuts, du Pont Vasco de Gamma à Lisbonne au Pont de Normandie, du Viaduc de Millau au double viaduc TGV d'Avignon. Il vient aujourd'hui nous parler de sa dernière grande réalisation : le troisième pont sur le Bosphore.



Naissance d'un pont : le 3^e pont sur le Bosphore

Michel Virlogeux

La construction des grands ouvrages est toujours une aventure, souvent très longue : 19 ans pour le Pont de Normandie, 17 pour le viaduc de Millau. Pour le grand pont sur le Bosphore, suspendu et haubané, l'aventure sera étonnamment brève : moins de 4 ans et demi.

¹ Portée d'un pont : longueur de la partie d'un pont comprise entre deux piles, ou entre une pile et une culée. La portée principale est la longueur de la travée la plus longue.

² Pont suspendu : pont dont le tablier est attaché au moyen de suspentes (tiges de suspension verticales) à des câbles flexibles dont les extrémités sont reliées aux culées sur les berges.

Petite histoire d'une révolution

Les grands ponts suspendus² de conception américaine, dont le plus bel exemple est le Golden Gate Bridge, sont des ouvrages en treillis³. L'augmentation de la portée du pont induisant une augmentation des effets du vent, allonger la portée implique de fabriquer des treillis de plus en plus gros pour résister au vent, ce qui coûte fort cher. Ainsi raisonnait-on jusqu'à une révolution née en Angleterre : le pont sur la Severn, conçu par les ingénieurs de Freeman, Fox et Partner, qui s'inscrit dans une logique de rupture. Au lieu de résister aux efforts du vent, il s'agit de les réduire par la forme profilée du tablier, qui laisse passer le vent en dessous et au-dessus. Après cette révolution, les records de portée et les innovations techniques se succéderont. Pour ma part, je n'aurais pu réaliser le pont du Bosphore si je n'avais d'abord fait un grand saut en avant avec le pont de Normandie, premier pont à haubans⁴ à entrer en compétition avec les ponts suspendus, puis le viaduc de Millau, novateur par sa succession de travées⁵ haubanées rompant avec les ouvrages à haubans classiques à deux pylônes et trois travées.

Le pont sur le Bosphore : un double défi

Tout commence fin février 2012, avec l'annonce d'un concours pour la construction d'un troisième pont suspendu sur le Bosphore, près de la mer Noire. Deux ponts enjambent déjà le détroit, conçus sur le modèle du pont sur la Severn. Le nouveau pont doit porter une autoroute à deux fois quatre voies de circulation et deux voies ferrées portant des trains lourds de 400 m de longueur. Le règlement insiste sur l'esthétique, qui doit rappeler celle des deux ponts existants. Ce qui exclut de répartir chaussées autoroutières et voie ferrée sur deux niveaux comme pour tous les grands ponts rail-route : premier défi. Deuxième défi : la date de remise du projet, fixée d'abord au 6, puis au 26 avril - soit neuf semaines pour concevoir le pont. Je décide de faire appel au bureau d'études T-ingénierie de Genève, dirigé par Jean-François Klein.

S'agissant d'un tablier profilé à un seul niveau, un problème se pose d'emblée : un pont suspendu subit des déplacements verticaux très importants sous les charges concentrées. Quand un train passe au quart de la travée, les câbles de suspension descendent sous la charge et remontent de l'autre côté. Je propose donc d'ajouter des haubans au voisinage des pylônes. Les charges concentrées au quart de la travée seront directement transmises au pylône correspondant, stabilisé par les

³ Barres métalliques triangulées, assemblées en treillis.

⁴ Pont à haubans : pont dont le tablier est suspendu par des câbles, eux-mêmes soutenus par des pylônes.

⁵ Travée : partie comprise entre deux piles, ou entre une pile et une culée.

haubans arrière, ce qui réduit le déplacement vertical du tablier d'un facteur 3. Ce concept a déjà été utilisé au XIX^e siècle par l'ingénieur Roebling pour les ponts du Niagara et de Brooklyn, puis en France pour le pont de Saint-Marien. Il nous permettra de réaliser une structure très élégante décrivant un trait mince au-dessus du détroit (figure 1).

En voici les principales données :

Portée : 1408 m. **Hauteur des pylônes** : 330 m au-dessus du Bosphore. **Largeur** : 58, 50 m, ce qui en fait le plus grand pont suspendu du monde (Portée x Largeur). **Ratio**

charges réparties/charges permanentes : 250/470 kN/m, soit 0,54. Pour le Pont de Normandie, c'est 36/130 kN/m soit 0,28.

Nous avons choisi d'augmenter la portée (1408 m au lieu de 1275 envisagés initialement) afin de simplifier la construction, donc de gagner du temps, et pour faciliter la navigation, en nous interdisant de placer un pylône dans le Bosphore.

Figure 1 : Le Troisième Pont du Bosphore



La conception du pont

Le pont est constitué d'une travée principale et de travées de rives extrêmement courtes en raison des rives abruptes. Ce qui implique que les câbles porteurs et une partie des haubans soient ancrés à terre et non sur les travées d'accès comme dans les ponts classiques. Dessinée par Jean-François Klein, la forme très élégante des pylônes, fûts inclinés vers l'intérieur et presque convergents au sommet, nécessitera que câbles porteurs et suspentes soient placés de part et d'autre de la voie ferrée (figure 2). En revanche, les haubans de la grande travée doivent être ancrés sur les rives afin d'améliorer la rigidité de torsion.

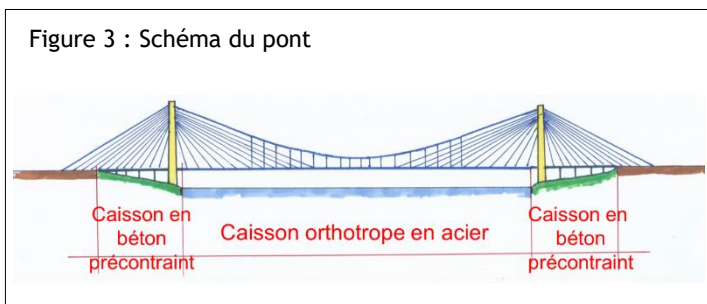
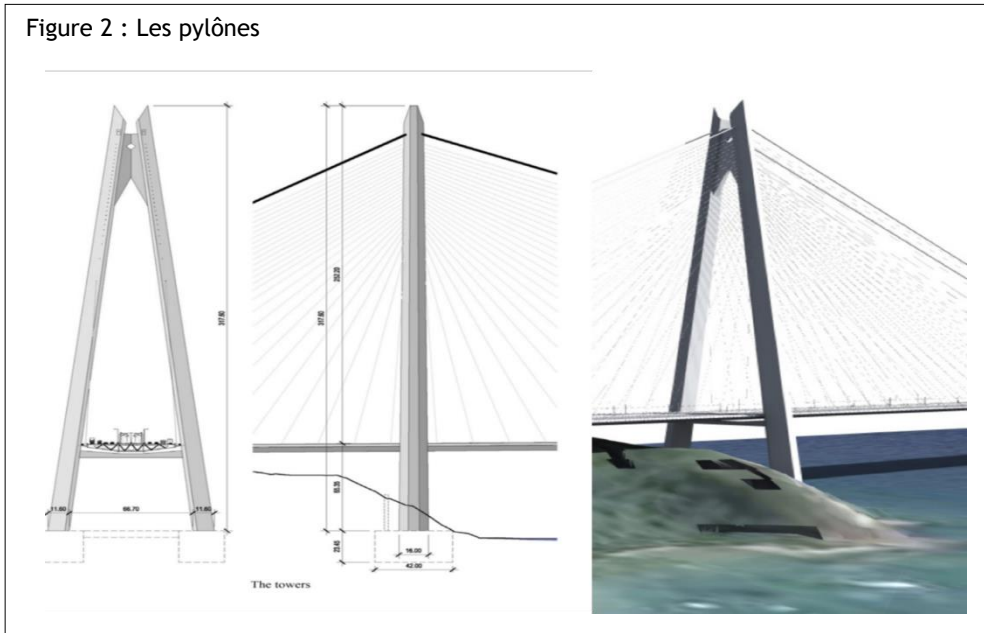
Matériaux. *Grande travée* : caisson orthotrope en acier, car le béton serait trop lourd. *Travées d'accès* : caisson en béton précontraint, beaucoup moins cher (figure 3).

Conditions de liaison. Le tablier s'appuie sur les culées⁶, les piles et les pylônes. Le blocage transversal ne se fait que sur les pylônes et les culées. Aucun blocage longitudinal, pour éviter que les efforts sismiques ne se concentrent sur un des deux pylônes.

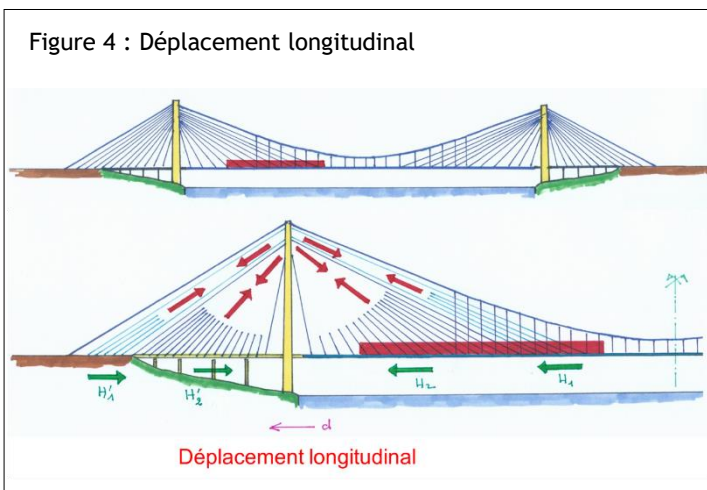
Suspension. Le pont est doté de 22 paires de haubans. 17 sont ancrées dans les travées de rive, 5 sont ancrées à terre dans un massif d'ancrage⁷. *Travées de rive* : uniquement des haubans ancrés de part et d'autre des voies ferrées. *Partie centrale* : purement suspendue, avec suspentes de part et d'autre des voies ferrées. *A partir des pylônes* : une partie purement haubanée, avec des haubans ancrés sur les rives, puis une zone de transition, avec suspentes au centre de part et d'autre des voies ferrées et haubans sur les côtés. Le but est d'éviter une brusque rupture de rigidité à la liaison entre les deux, qui entraînerait des concentrations de moment de flexion.

⁶ Culée : appui d'extrémité d'un pont, sur chaque rive.

⁷ Massif d'ancrage : structure en béton armé, ancrée sur la terre ferme, d'où partent les câbles.



Ces choix ont un impact direct sur l'équilibre des efforts. L'étude de l'équilibre des forces longitudinales montre que la seule façon d'équilibrer l'ouvrage à vide est qu'il y ait une traction dans la partie centrale dans la grande travée - singularité de ce pont. Quant à l'équilibre avec charges, pour l'assurer, des appareils d'appui pendulaires en forme d'olive seront installés sur tous les appuis à l'exception des culées. Ils permettront de réduire les déplacements longitudinaux, à la fois par friction et par effet pendulaire (figure 4).



Les études (nature du terrain, sismiques, climatologiques) réalisées par Greisch et le CSTB mettent en évidence des efforts sismiques extrêmes inférieurs de moitié aux efforts extrêmes produits par le vent. D'où la nécessité d'études au vent très poussées : analyse de données statistiques météorologiques, mesures sur site par un anémomètre, à partir de quoi on construit un modèle numérique du site pour évaluer la répartition des vitesses et de la turbulence des vents. On passe ensuite aux essais en soufflerie, et enfin, à la demande instante des Turcs, un essai aéroélastique complet sur une maquette à 1/180, réalisé au Politecnico Milano.

La construction du pont

Contrastant avec la phase conception réduite à quatre ou cinq personnes, la phase construction réunit un très grand nombre d'acteurs - près d'une centaine rien que pour les ingénieurs. Les entreprises sont Hyundai et SK.

Une avancée provisoire sur le Bosphore au niveau du futur pont est préalablement construite pour les besoins du chantier. Les pièces métalliques sont fabriquées dans un chantier naval.

Fondations des pylônes : cylindres de 20 m de diamètre et 20 m de hauteur en béton armé. Jean-François Klein avait prévu des cylindres creux, les Turcs exigeront des coffrages pour plus de simplicité.

Massifs d'ancrage : une faille ayant échappé aux sondages côté Asie, il faudra préalablement ôter l'argile et tout bétonner. Les massifs sont typiques des ponts suspendus, avec une sellette à l'entrée où arriveront les grands câbles porteurs. Partout, de la précontrainte transversale.

Travées de rives en béton : les portées sont très faibles, 45 m, 60 m, 68,3 m. En raison de la largeur des travées, nous optons pour moins d'âmes (« poutres ») longitudinales et plus de pièces transversales. Les haubans sont ancrés de part et d'autre du train, avec de gros amortisseurs.

Pylônes : les Turcs et les Coréens imposent contre notre avis des coffrages glissants. Arrivés à 208 mètres, ils y renoncent pour adopter nos coffrages auto-grimpants. En raison de l'inclinaison des fûts, je fais installer des vérins de façon à compenser les flèches⁸. Les pylônes seront presque finis en novembre 2014.

Boîtes d'ancrage des haubans : en travée centrale, les haubans sont ancrés dans les rives et à l'arrière, de part et d'autre de la voie ferrée. Les pièces d'ancrage sont donc un peu twistées. Chaque pièce doit être analysée au point de vue géométrique, de façon parfaite. Au total, le poids des pièces d'ancrage est de 2800 tonnes. **Selle**⁹ : fabriquée en deux moitiés de 100 tonnes, elle est dissymétrique, l'inclinaison des câbles étant différente à l'avant et à l'arrière.

Suspension : les câbles sont constitués de « torons¹⁰ » composés de 127 fils de 5,4 mm de diamètre, avec une résistance de 1860 mégapascals. *Dans la travée centrale* : 113 torons de 127 fils. *Dans les travées de rive* : 122, pour des raisons de géométrie. Pour fabriquer les câbles, on suspend entre les pylônes un treillis, le catwalk. Amenés par téléphérique, les torons y sont assemblés pour former le câble. Une fois constitué, le câble est compacté à l'aide d'un système de vérins qui vient serrer le tout, puis sont mis en place les colliers où seront fixées les suspentes.

Grande travée : les voussoirs¹¹ courants mesurent 24 m et pèsent 2000 tonnes. Ils sont amenés par une grue flottante jusqu'à l'avancée provisoire sous le pont, puis transportés par crawler à l'extrémité du fléau où ils sont levés par deux derricks ou « chèvres » pesant 600 tonnes chacun. Ces engins de levage sont disposés sur les côtés, afin que la déformation transversale de la pièce levée soit à peu près la même que celle de la pièce déjà en place, sans quoi la soudure serait impossible. Des cabanages permettent d'exécuter les soudures à l'abri du vent et de la pluie. Le premier voussoir métallique arrive le 25 décembre 2014, c'est-à-dire au bout de 32 mois.

Le pont sera inauguré en août 2016.



Débats

La rapidité des délais pour le pont du Bosphore a-t-elle entraîné un surcoût ?

Michel Virlogeux : C'était un appel d'offres de concession. Le concessionnaire fait à l'Etat une offre « terminé » : le client n'en entend plus jamais parler. Quant aux entreprises, elles font également une offre, mais une offre globale ; en cas de problème, elles perdent de l'argent. Donc, pour l'Etat turc et le concessionnaire, il ne pouvait y avoir aucun problème de dérive financière.

Longtemps, on a disposé des amortisseurs de camions en bas des haubans pour éviter les vibrations intempestives. Cette solution est-elle toujours utilisée ou a-t-on trouvé mieux ?

Michel Virlogeux : On y recourt toujours, mais d'autres solutions existent. Pour le pont de Normandie, j'ai utilisé des « aiguilles » - câbles reliant les câbles entre eux. Il s'agissait de modifier les fréquences de vibration des haubans, très proches des fréquences de vibration verticales du tablier, d'où le risque de résonance. Dans le cas du pont du Bosphore, nous redoutions surtout les effets d'accumulation de neige et de glace sur les haubans, qui modifient l'écoulement aérodynamique. Aussi avons-nous installé des amortisseurs extrêmement puissants.

Pouvez-vous dire quelques mots de vos collaborations avec de grands architectes, par exemple, Charles Lavigne, Renzo Piano ou Foster, ainsi que de vos expériences en matière de ponts courbes ?

⁸ Flèche : résultat de la flexion d'un pont.

⁹ Selle : pièce spéciale disposée au sommet de chaque pylône, et qui sert à fixer ou soutenir les câbles en cet endroit.

¹⁰ Torons : fils retordus ensemble.

¹¹ Voussoirs : éléments préfabriqués assemblés pour former le tablier d'un pont.

Michel Virlogeux : J'aimerais évoquer ici le pont de Térénez, en Bretagne, qui fait partie des cinquante que j'ai réalisés avec Charles Lavigne. Compte-tenu de la configuration de la route, il m'était apparu qu'un pont courbe s'imposait, pour faciliter la circulation. Seulement, comment éviter que les camions ne tapent les haubans ? J'ai choisi de basculer un peu le pylône. Or, les calculs ont mis en évidence un problème majeur qui m'avait échappé : avec l'inclinaison du pylône, 90 % de la charge passait dans la jambe intérieure et 10 % dans l'autre. Car avec la courbure du pont, le centre de gravité n'est pas au niveau des pylônes mais décalé vers l'intérieur. Charles et moi avons passé plusieurs mois à chercher des idées. J'ai fait une proposition qu'il a jugée horrible, il en a fait une que j'ai refusée tout net. Et un beau jour, j'ai trouvé la solution, que j'ai vite gribouillée sur une feuille. Charles, instantanément, a finalisé le dessin, puis la maquette dans la foulée. Une complicité idéale. Les ponts courbes n'en demeurent pas moins extrêmement compliqués.

Vous avez une vision à peu près mondiale de la technicité des ponts. Y a-t-il des réglementations très spécifiques pays par pays, ou existe-t-il une certaine harmonisation mondiale ?

Michel Virlogeux : En Europe, c'est aujourd'hui réglé grâce aux Eurocodes - avec parfois des annexes nationales pour modifier certains coefficients. L'Angleterre, évidemment, a ses propres coefficients. Les États-Unis ont également leur propre système, organisé par les ingénieurs des administrations des différents États. Mais grâce aux associations internationales, une philosophie générale est passée. En particulier, le Comité européen du béton a développé dans les années 1970 des études de sécurité, qui ont globalement reçu l'assentiment international. On observe en revanche, hélas, une tendance générale : la prédominance croissante des universitaires sur les ingénieurs. Avec pour résultat beaucoup de complications inutiles...

Mots clés : Bosphore, innovation de rupture, pont haubané, pont rail-route, pont suspendu, précontrainte, suspension, tablier profilé

Citation : Michel Virlogeux & Yves Malier. (2023). *Les défis de la construction des grands ponts*. Les soirées de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. academie-technologies.fr

Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Denis Ranque. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteurs : Laurence Decréau. N°ISSN : en attente.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.