

La conception des ponts



Les ponts en arc de l'autoroute Caracas-La Guaira, au Venezuela : levage du cintre central.

Jean Muller

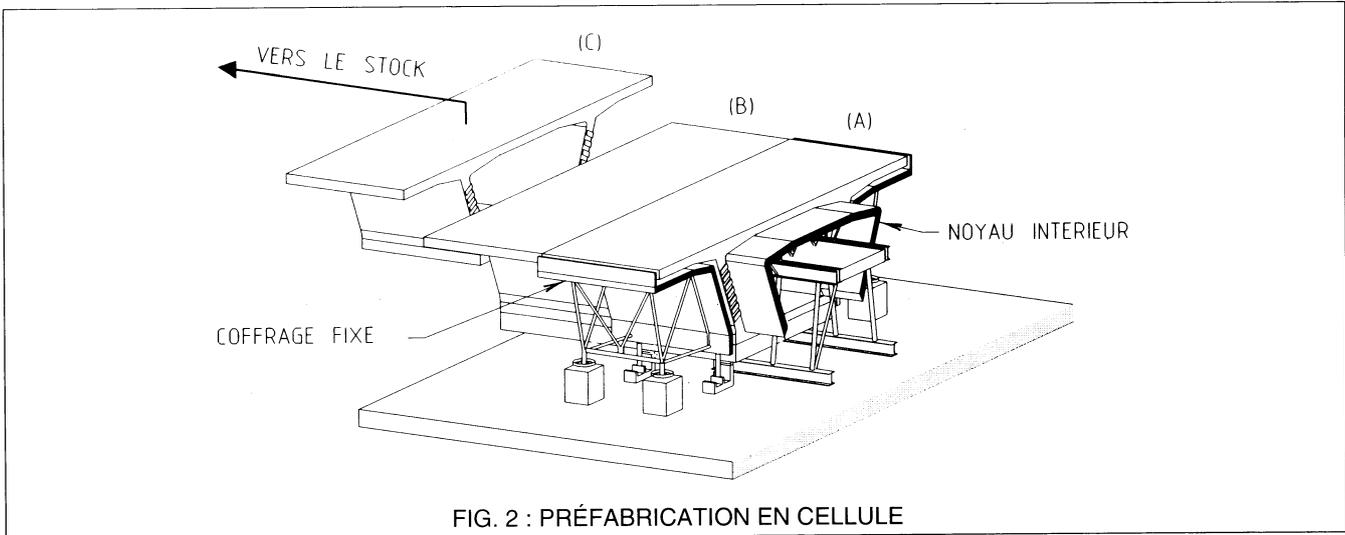
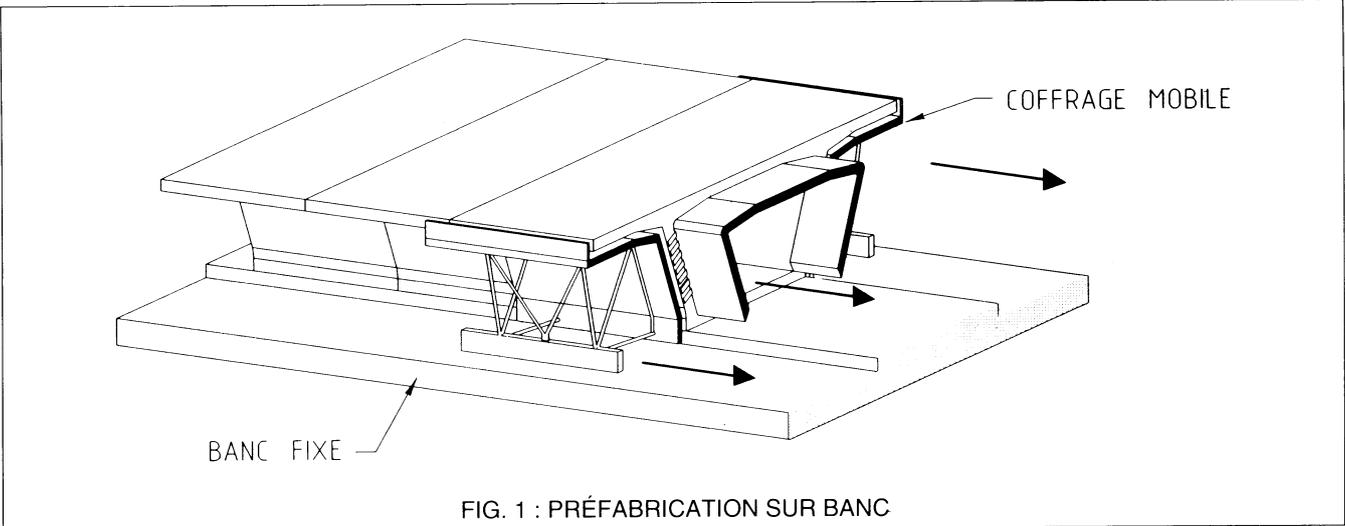
RÉTROSPECTIVE

Le privilège d'avoir travaillé pendant plusieurs années avec un grand constructeur – Eugène Freyssinet – ne s'oublie pas, surtout lorsque quelques axiomes lapidaires s'associent de façon inoubliable à la mémoire d'un homme ayant commandé à la fois le respect et l'admiration : « Jeune homme, ne cherchez pas à monter au ciel en vous tirant par les cheveux. N'oubliez pas non plus le théorème du chapeau : si vous voulez suspendre votre chapeau au mur, vous le placez sur la patère fixée à celui-ci, car si vous le placez au-dessous, il tombera inmanquablement au sol. »

Suivre le trajet des efforts dans la structure, en modelant la matière pour les supporter de la façon la plus rationnelle et la plus économique était ainsi un souci constant des élèves du maître, sans oublier ni d'assurer la continuité mécanique de tous les éléments structurels, la suspension et le report des charges, ni la rigueur pour faire concourir les lignes d'épure.

Mais Freyssinet lui-même gardait le souvenir de ceux qui l'avaient précédé et répétait souvent cet adage de Séjourné, le grand constructeur de tant de voûtes remarquables en maçonnerie : « Il n'est pas permis de faire laid. » Aussi, dans une époque où le souci de l'esthétique et la protection de l'environnement ne recevaient pas l'attention qu'on leur accorde aujourd'hui, Freyssinet s'attachait-il toujours à inscrire de façon harmonieuse dans leur site les ouvrages qu'il projetait, en s'aidant de maquettes, de photographies, de montages, mais surtout en ayant recours à son goût et à son extraordinaire expérience.

Parmi les derniers grands ouvrages où Freyssinet a laissé la marque de son génie les ponts en arc de l'autoroute Caracas-La Guaira, au Venezuela, avaient fourni l'occasion de mettre en œuvre des techniques à la fois audacieuses et très sûres. Progressant à partir des piles sur des échafaudages en bois cloué suspendus par des haubans, les arcs étaient coulés par tronçons successifs sans appui au sol. Puis, la partie centrale des arcs (atteignant 80 m de portée libre) était construite sur un cintre retroussé appuyé sur les retombées latérales. Préfabriqué en tronçons légers assemblés au fond de la gorge, ce cintre avait été levé à son emplacement d'utilisation en une seule pièce pesant 200 t.





Ci-contre : le pont de Choisy-le-Roy : ouvrage terminé.

Fig. 1 - Préfabrication sur banc.

Fig. 2 - Préfabrication en cellule.

Ci-dessus : le viaduc de Linn Cove aux États-Unis.

Il est difficile pour un ingénieur d'aujourd'hui, qui possède l'appui des méthodes modernes de calcul électronique, de s'imaginer les problèmes matériels posés par l'élaboration du projet détaillé d'un tel ouvrage. Pour la simple étude statique de l'effet du vent sur les arcs, nous avons tenté de résoudre un système de 22 équations à 22 inconnues (c'était en 1950). Il avait fallu envoyer la résolution du système à Londres au siège d'une société maintenant bien connue. Les résultats n'étaient pas cohérents, car des erreurs numériques s'étaient glissées dans les coefficients des équations (rigidité des différents éléments de la structure). Après plusieurs essais infructueux, les efforts ont été finalement évalués d'après les estimations faites *a priori* par Freyssinet au cours des études préliminaires, et les ouvrages ont supporté sans faiblesse la rigueur des sollicitations climatiques depuis plus de trente ans.

Le principe de construction des ponts de Caracas a été repris par d'autres, en divers pays, dont la France ; il n'est pas hors de propos de garder le souvenir de l'origine de ces méthodes et de leur première mise en œuvre.

Sans négliger l'intérêt que peut susciter la recherche de solutions originales dans le domaine des grands ouvrages de génie civil, il convient de reconnaître que peu d'ingénieurs parviennent à échapper au pouvoir de fascination qu'exercent sur leur esprit l'étude et la réalisation des grands ponts. C'est ainsi qu'à partir de 1960 nous nous sommes attachés à perfectionner les méthodes de construction des ponts préfabriqués en béton précontraint.

Plusieurs années auparavant, des arcs surbaissés avaient été réalisés à l'aide d'éléments préfabriqués (appelés voussoirs) assemblés par précontrainte. Le coulage des joints traditionnels au mortier ralentissait toutefois singulièrement le rythme de mise en place des éléments et ôtait une partie importante des avantages intrinsèques de la préfabrication.

C'est à l'occasion de la construction du pont de Choisy-le-Roi sur la Seine (voir p. 272) que cette difficulté a été résolue de façon définitive en appliquant pour la première fois la technique des joints conjugués. Les éléments sont préfabriqués les uns contre les autres, la phase terminale d'un élément servant ainsi de moule à la face antérieure de l'élément suivant. Après coulage et durcissement, les éléments sont séparés les uns des autres pour assurer leur transport au lieu d'assemblage ; ils retrouveront sans difficulté leur position relative à l'aide de clés de centrage. Le joint lui-même est enduit d'une couche très mince de résine polymérisable qui assure son étanchéité et lui confère une certaine résistance à la traction.

La méthode de construction est générale et peut s'étendre à de très nombreuses applications dans des domaines variés : tabliers et appuis de pont, ouvrages d'art, bâtiments. Sa caractéristique essentielle est la rapidité de construction qu'elle autorise, puisque la réalisation des joints est elle-même très courte – le temps d'application de la résine – et que les précontraintes d'assemblage qui assurent la résistance de l'ouvrage peuvent être appliquées immédiatement. Plusieurs voussoirs peuvent être mis en place en un seul poste de travail, de sorte que les cadences d'avancement sont beaucoup plus rapides que celles obtenues sur des ouvrages coulés en place.

LA PRÉFABRICATION

Pour les premiers ouvrages (ponts de Choisy-le-Roi et de Courbevoie, viaduc d'Oléron), la préfabrication a été réalisée sur un long banc (fig. 1). Une base fixe établie sur le sol, d'une longueur égale à celle d'une travée (la distance entre deux piles

successives) porte des moules qui permettent la préfabrication de chaque voussoir. Les voussoirs restent à poste fixe sur le banc, tandis que les moules sont déplacés le long de celui-ci pour le coulage des voussoirs les uns à la suite des autres. La méthode s'applique bien à la réalisation de tabliers rectilignes (de hauteur constante ou variable). Pour les ouvrages à géométrie évolutive (courbure en plan ou dévers transversal variable), il est préférable de recourir à la méthode du banc court (fig. 2). Les voussoirs sont alors fabriqués dans une cellule fixe dans laquelle chaque élément du tablier occupe d'abord la position de coulage (A), puis celle de contre-moule du voussoir suivant (B), avant d'être transféré au stock (C). Le réglage relatif du voussoir en position de contre-moule par rapport à la cellule de préfabrication permet de s'adapter aux variations géométriques les plus tourmentées ; l'exemple le plus remarquable est la construction du viaduc de Linn Cove aux Etats-Unis, réalisé dans un parc national des Appalaches en Caroline du Nord (voir p.273), qui présente des rayons de courbure en plan de 85 m accompagnés d'importantes variations du dévers transversal, qui s'inverse de + 10 % à - 10 % en quelques dizaines de mètres seulement.

LA POSE DES VOUSSOIRS DANS L'OUVRAGE - LA POUTRE DE LANCEMENT

La pose des voussoirs dans l'ouvrage a été réalisée selon différentes méthodes. Lorsque le site le permet, les voussoirs sont simplement posés avec une grue déplacée sur le sol ou installée sur un ponton flottant. Alternativement, des treuils installés sur le tablier déjà construit permettent de monter chaque voussoir à sa position définitive. Là, des dispositifs provisoires d'accrochage le maintiennent en place, tandis que des clés de centrage permettent de retrouver sans peine dans l'ouvrage la vraie position du voussoir relativement aux voussoirs adjacents.

La méthode la plus efficace et la plus élégante consiste toutefois à confier la pose des voussoirs à un portique automateur se déplaçant sur le tablier déjà construit et permettant une complète autonomie du chantier de pose, autorisant des cadences très rapides. C'est ainsi que le viaduc d'Oléron, de 3 000 m de longueur, a été construit, études comprises, dans un délai à peine supérieur à deux ans (1964-1966). La poutre de lancement (voir ci-dessous) prend les voussoirs sur le tablier et les pose de part et d'autre du fléau en cours de construction. A l'achèvement de celui-ci et grâce à un transfert

Le viaduc d'Oléron : poutre de lancement.



d'appuis, la poutre est lancée à la pile suivante pour permettre la construction d'un nouveau fléau. Progressant ainsi d'appui en appui de façon indépendante des difficultés du site (relief montagneux accidenté, courants ou marées), la pose du tablier s'opère de façon régulière, rapide et économique.

Bien des améliorations technologiques ont été apportées à la méthode au fur et à mesure de ses applications successives. L'exemple contemporain le plus remarquable est celui du viaduc de l'autoroute H-3 dans les îles Hawaïi (USA).

LE VIADUC DE L'AUTOROUTE H-3 À HAWAII

Cet ouvrage est construit sur la nouvelle autoroute destinée à relier les plages de la côte nord de l'île Oahu (la plus grande des îles de l'archipel où se trouve la capitale, Honolulu) à la baie de Pearl Harbor. Le site est d'une exceptionnelle beauté, mais aussi d'un relief particulièrement tourmenté pour accueillir le nouveau viaduc.

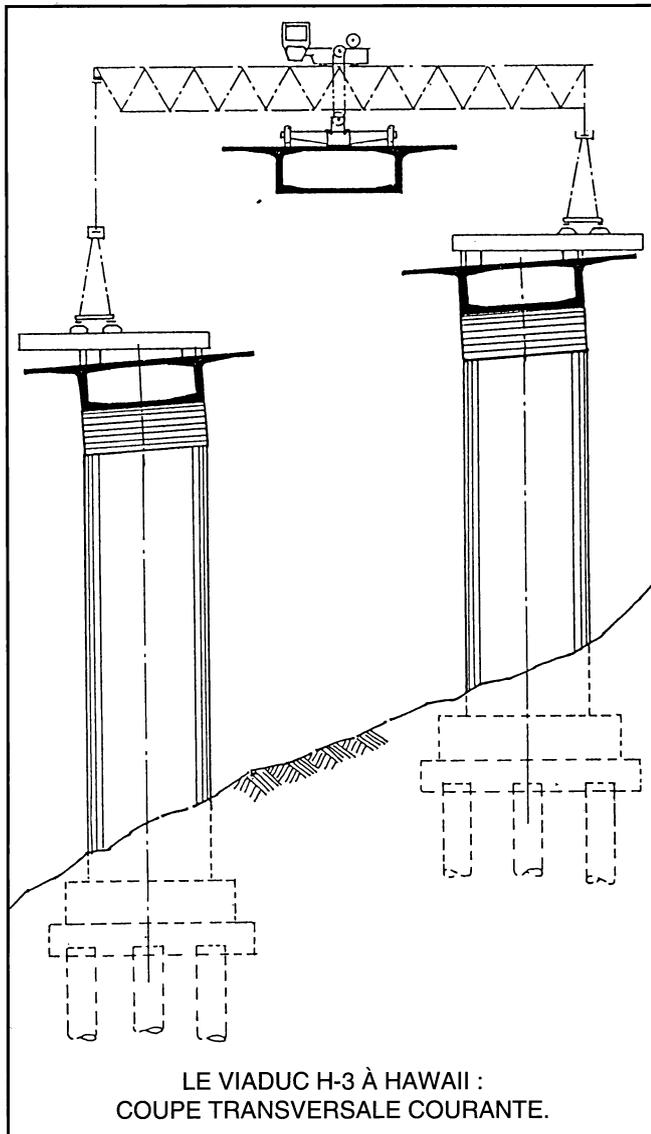
Deux tabliers jumeaux, d'une longueur de 2 020 m chacun, s'implantent ainsi à flanc de montagne, portés par des piles espacées en moyenne de 87 m. La pente longitudinale moyenne de l'ouvrage est de 5 %, les rayons de courbure en plan de 500 m

s'accompagnent de variations du dévers transversal de 7 %. En définitive la géométrie de l'ouvrage est complexe et constamment variable d'une extrémité à l'autre.

Les 1 340 voussoirs préfabriqués des deux tabliers jumeaux ont été produits dans une usine située à 24 km du pont, équipée de cinq cellules fonctionnant sur le principe du court banc. Acheminés par route sur des remorques porte-chars, les voussoirs sont repris sur le site par une poutre de lancement innovante mise au point pour ce projet. Deux poutres longitudinales en acier sont portées par les deux tabliers en cours de construction, tandis qu'un portique de pose transversal, se déplaçant sur la face supérieure de ces poutres, transporte tous les voussoirs à leur emplacement définitif, sur l'un ou l'autre des tabliers.

En dépit de la complexité géométrique du projet, la cadence de pose est remarquable : quatorze voussoirs ont été posés au cours d'une seule journée de travail. A ce rythme, l'ouvrage devrait être terminé à la fin de l'année 1992, six mois avant l'expiration du délai contractuel (hors intempéries).

L'utilisation de la préfabrication pour la construction des tabliers et la simplification des fondations des piles (particulièrement sensibles à réaliser dans un site protégé) ont fait l'objet d'une variante proposée par l'entreprise à son client ¹.



L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LES PONTS

Un problème délicat se présente toujours dans les ouvrages de grande longueur comme le pont décrit ci-dessus. Les matériaux (béton et acier) sont dilatables en fonction de la température ambiante et subissent des transformations partiellement irréversibles sous l'effet des charges qu'ils supportent (fluage du béton et relaxation de l'acier). Il faut donc laisser respirer les tabliers des ponts en disposant à des intervalles réguliers (habituellement tous les 300 à 500 m) des joints de dilatation.

Où faut-il placer ces joints, qui doivent assurer de toute façon la continuité de la surface de roulement de la circulation routière ou la continuité des rails de la circulation ferroviaire. Ce choix doit concilier :

- les exigences d'ordre structurel, de sorte que la coupure du joint de dilatation ne perturbe pas trop les contraintes dans l'ouvrage et surtout ne provoque pas de discontinuités géométriques inesthétiques ou gênantes pour l'exploitation ;
- les conditions de réalisation de l'ouvrage : la position du joint doit tenir compte du mode de construction, sinon on aboutit à de sérieuses difficultés de mise en œuvre sur le chantier.

L'historique des ponts construits par fléaux successifs (symétriques par rapport aux différentes piles) est à cet égard très instructif. Les premiers constructeurs ont prévu les joints de dilatation au centre d'une travée, là où se touchent deux fléaux adjacents : la position est idéale pour simplifier le projet et sa construction ; en revanche, pour les ouvrages de grande portée, le résultat est catastrophique au point de vue de la géométrie de l'ouvrage et de la pérennité de ses formes dans le temps.

Pour pallier ce défaut, nous avons alors prévu de placer les joints au quart de la portée ; c'est l'idéal au point de vue géométrique, mais la construction se complique sérieusement.

Peut-on trouver un meilleur compromis ? En fait, les difficultés viennent de ce que l'ingénieur se laisse gouverner par la matière, au lieu de l'inverse. La réponse est, au contraire, « Ne

pas subir » (maréchal de Lattre de Tassigny), remplaçant la démarche passive par une démarche active. C'était précisément le processus qui a conduit Eugène Freyssinet, dans sa révolution dans l'art de bâtir (en 1930), à introduire l'idée de précontrainte des structures. Les armatures passives de béton armé sont alors remplacées par les armatures actives du béton précontraint. L'idée de précontrainte s'est révélée très générale et peut être étendue à de nombreux domaines du génie civil.

Dans le domaine plus restreint de la dilatation des ouvrages, la même démarche conduit à substituer des joints actifs aux joints traditionnels (Fig.3). A cet effet, une pièce continue (généralement métallique) traverse le joint sans empêcher les dilatations relatives des deux éléments de tablier en regard. Dans les ouvrages courants, il suffit en pratique d'opérer le réglage de la poutre juste avant l'ouverture à la circulation puis, une autre fois, après deux ou trois ans, lorsque le fluage du béton est pratiquement terminé.

Pour de grandes portées, des structures souples et des surcharges très lourdes (trains minéraliers, par exemple) il est possible d'asservir dynamiquement et en temps réel les efforts dans la poutre aux déformations du tablier. La continuité du profil des chaussées ou des rails peut ainsi être réalisée d'une manière qui n'était pas envisageable autrefois.

On peut aller plus loin dans cette voie de l'intelligence artificielle en contrôlant de façon active les liaisons de l'ouvrage à son environnement ou les liaisons des différents éléments de structure entre eux. Un asservissement dynamique peut alors être établi entre les actions extérieures (surcharge, vent, séisme) et la réponse de la structure à celles-ci.

Les applications de ce principe dépassent de beaucoup le simple problème de la dilatation des tabliers. Aujourd'hui, le génie civil est très en retard par rapport à d'autres domaines tels que l'automobile (suspension active et antiblocage de sécurité) ou les structures *off shore* (positionnement dynamique des plates-formes). L'idée brièvement exposée ci-dessus devrait permettre d'intéressantes applications qui aideraient à combler ce retard.

CONSTRUCTION DES PONTS PAR TRAVÉES ENTIÈRES AVEC PRÉCONTRAINTÉ EXTÉRIEURE

Au cours de la période 1950-1980, le développement remarquable des ponts en béton a fait appel à plusieurs techniques :

- coulage en place du tablier sur un échafaudage ou mise en place de poutres préfabriquées pour les petites ou moyennes portées (jusqu'à 40 m ou 50 m) ;

- construction par encorbellement, c'est-à-dire par fléaux symétriques par rapport aux piles (les appuis de l'ouvrage). L'utilisation des voussoirs préfabriqués a été l'occasion de créer une nouvelle famille d'ouvrages ayant connu un essor très rapide à l'échelle mondiale.

Dans tous ces ouvrages, la précontrainte (les armatures actives assurant la résistance) était créée par des câbles d'acier à haute résistance placés dans des conduits ménagés à l'intérieur du béton et mis en traction après durcissement de celui-ci (c'est la post-tension).

C'est à l'occasion de projets étudiés pour l'Administration américaine que nous avons eu l'occasion d'associer pour la première fois la technique des voussoirs préfabriqués à joints conjugués et la précontrainte extérieure dans la construction de tabliers de grande longueur avec des portées multiples moyennes

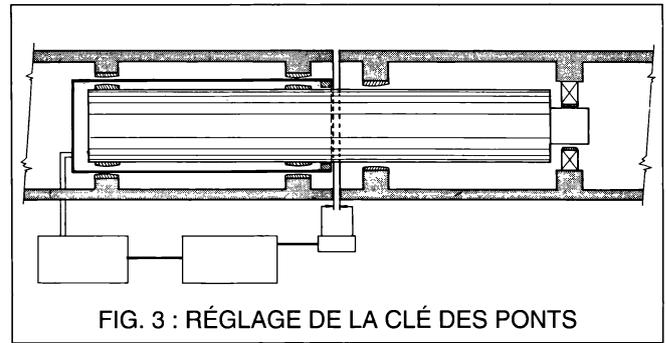


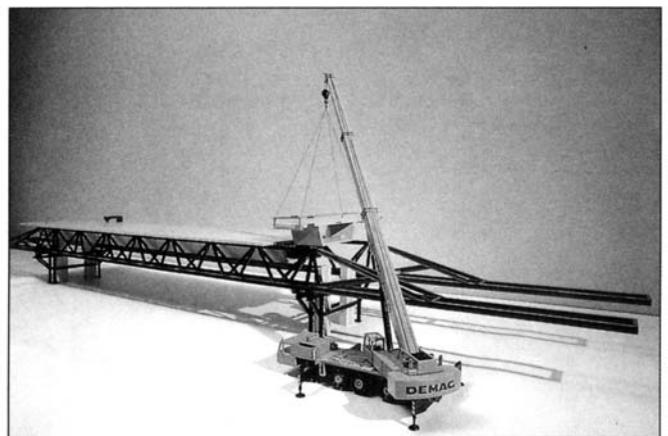
FIG. 3 : RÉGLAGE DE LA CLÉ DES PONTS

(de 30 à 50 m) par travées entières sur un cintre automoteur. Tout caractère artisanal de la construction est ainsi éliminé, pour la réduire à son essentielle simplicité. On peut construire des tabliers à des cadences exceptionnellement rapides et pour un coût très bas, grâce à l'industrialisation des techniques. Les entrepreneurs américains ont répondu au-delà de nos espérances, en ajoutant à nos conceptions leurs habitudes de méthode et de rationalisation.

Les voussoirs préfabriqués ont des formes simples permettant une construction aisée. Ils sont posés les uns à côté des autres sur un cintre provisoire (voir ci-dessous), puis assemblés, après réglage, par des câbles de précontrainte extérieurs au béton mais disposés à l'intérieur de l'alvéole centrale. Par croisement des câbles au-dessus des appuis, on assure en outre la continuité des différentes travées, de sorte que les voussoirs forment une structure monolithe continue résistante. Le cintre (ou les deux cintres latéraux visibles sur le cliché) peut être alors déplacé à la travée suivante.

Le procédé permet la construction de plusieurs travées par semaine avec un seul équipement de pose, cadence qui n'est pas réalisable avec d'autres méthodes de construction.

Les premières applications concernaient les ponts des Keys



POSE PAR TRAVÉES ARRIÈRE

de Floride, au sud de Miami, où quatre grands ouvrages ont été ainsi réalisés. Le plus grand, le pont de Seven Mile, comprenant 266 travées de 42 m de portée, a été achevé en moins de trois ans, avec un an d'avance sur le délai contractuel (voir page suivante).

Plus récemment, la même technique a permis de construire l'autoroute surélevée de San Antonio, au Texas. Le projet comprenait six contrats de travaux s'étendant sur une période de six ans pour la construction d'un ouvrage de 280 000 m², pour un coût total de 220 millions de dollars.

Deux exemples récents de ces méthodes méritent toutefois une description plus détaillée.



Vue aérienne du pont de Seven Mile aux Etats-Unis. © Albert Bérenghier.

LE VIADUC FERROVIAIRE DE MONTERREY

Deuxième ville du Mexique par sa population, la ville de Monterrey se dote d'un système de transports in situ propre pour tenter de résoudre le problème endémique de la congestion des grandes villes. La première phase de ce métro aérien comprend une ligne à double voie de 18,5 km, portée par un viaduc de 619 travées d'une portée moyenne de 27 m. Les dix-huit stations, établies à une distance moyenne de 1 000 m sont également portées par le viaduc dont la structure est adaptée en conséquence par adjonction de consoles préfabriquées portant les quais des voyageurs.

Le tablier est en voussoirs préfabriqués à joints conjugués assemblés par précontrainte extérieure avec joints secs (le climat permet de faire l'économie du film de résine époxyde dans les joints entre voussoirs). Les 6 500 voussoirs du projet ont été construits dans une usine située en dehors de la ville, où vingt longs bancs étaient équipés de vingt-six coffrages pour les voussoirs courants et de quatorze coffrages spéciaux pour les voussoirs au-dessus des piles du viaduc. La pose des voussoirs dans l'ouvrage était assurée par huit cintres d'assemblage travaillant simultanément. En moyenne, chaque cintre permettait la construction d'une travée en deux ou trois jours.

Le premier voussoir a été coulé en octobre 1988, tandis que la dernière des 619 travées était assemblée en juillet 1990. Ce projet a donc été réalisé en deux ans par des entreprises locales n'ayant aucune expérience antérieure de nos méthodes. Aucun procédé traditionnel n'aurait permis de telle réalisation.

LE RÉSEAU ROUTIER SURÉLEVÉ DE BANGKOK

A son achèvement, cet immense projet constituera, pour un temps, le record d'utilisation de la méthode des voussoirs préfabriqués.

Les contrats en cours intéressent la construction de viaducs au-dessus de la ville d'une longueur totale de 66 km pour une surface de 770 000 m². A titre de comparaison, le plus grand échangeur parisien (de l'autoroute B3 Sud) représente 80 000 m² de tablier.

Les 1 575 travées à construire, d'une portée moyenne de 42 m, supposent la réalisation de 20 500 voussoirs (longueur 3,40 m pour une largeur de 12,20 m ou 15,60 m). Un chantier de préfabrication établi en dehors de la ville permet leur construction à l'aide de 46 cellules (32 pour les voussoirs courants, 14 pour les voussoirs sur les piles). La production a débuté en février 1991. A la date de cet article (mai 1992), la cadence mensuelle se maintient entre 900 et 1 000 voussoirs, l'équivalent du plus grand ouvrage français, le pont de l'île de Ré.

Un projet d'une telle ampleur soulève évidemment des problèmes nouveaux : par exemple, la production des plans d'atelier de tous les voussoirs à construire. La tâche n'a pu être menée à bien que grâce au secours de l'informatique, qui nous a permis de générer de façon presque entièrement automatique toutes les données nécessaires à la fabrication et au réglage des voussoirs.

La pose des voussoirs dans l'ouvrage est réalisée par travées entières, avec précontrainte extérieure sur cintres d'assemblage. Quatre contrats ont été passés avec des groupements d'entreprises pour cette phase des travaux. Les voussoirs sont en général transportés sur les tabliers déjà construits pour réduire la gêne à la circulation au sol, déjà intolérable en l'absence des travaux de construction du nouveau viaduc.

LES PONTS À HAUBANS

Dans les ouvrages décrits jusqu'ici, la portée (c'est-à-dire la distance entre deux appuis successifs de l'ouvrage) était faible, de sorte que la poutre porteuse constituant le tablier pouvait être dotée de la résistance lui permettant de supporter son propre poids et le passage des surcharges (camions ou trains).

En raison de son poids important en regard de sa résistance, le béton est limité dans la portée qu'il permet de franchir sans appuis intermédiaires. Le pont sur le canal maritime de Houston aux Etats-Unis, avec sa portée libre de 228 m, s'approche déjà de la limite pratique de ce genre d'ouvrage. On pourra dans l'avenir aller un peu plus loin (300 m environ) en utilisant des bétons à haute performance. La résistance ultime des bétons traditionnels (300 à 500 kg/cm²) peut en effet être doublée par un choix judicieux des agrégats et du ciment et par l'adjonction d'une fine poudre de silice (les sources naturelles existent en France) ; on sait aujourd'hui réaliser industriellement des bétons de résistance à la compression de 1 000 kg/cm² (1 000 fois la pression atmosphérique).

On peut en même temps améliorer l'efficacité de la poutre du tablier en faisant appel à une structure dite en treillis (Fig. 4). La dalle supérieure est en béton, pour porter la circulation. Une membrure inférieure en forme d'arc est réalisée en béton près des appuis, et en acier au milieu de la travée. La liaison entre les deux membrures est assurée par des pièces légères appelées diagonales,

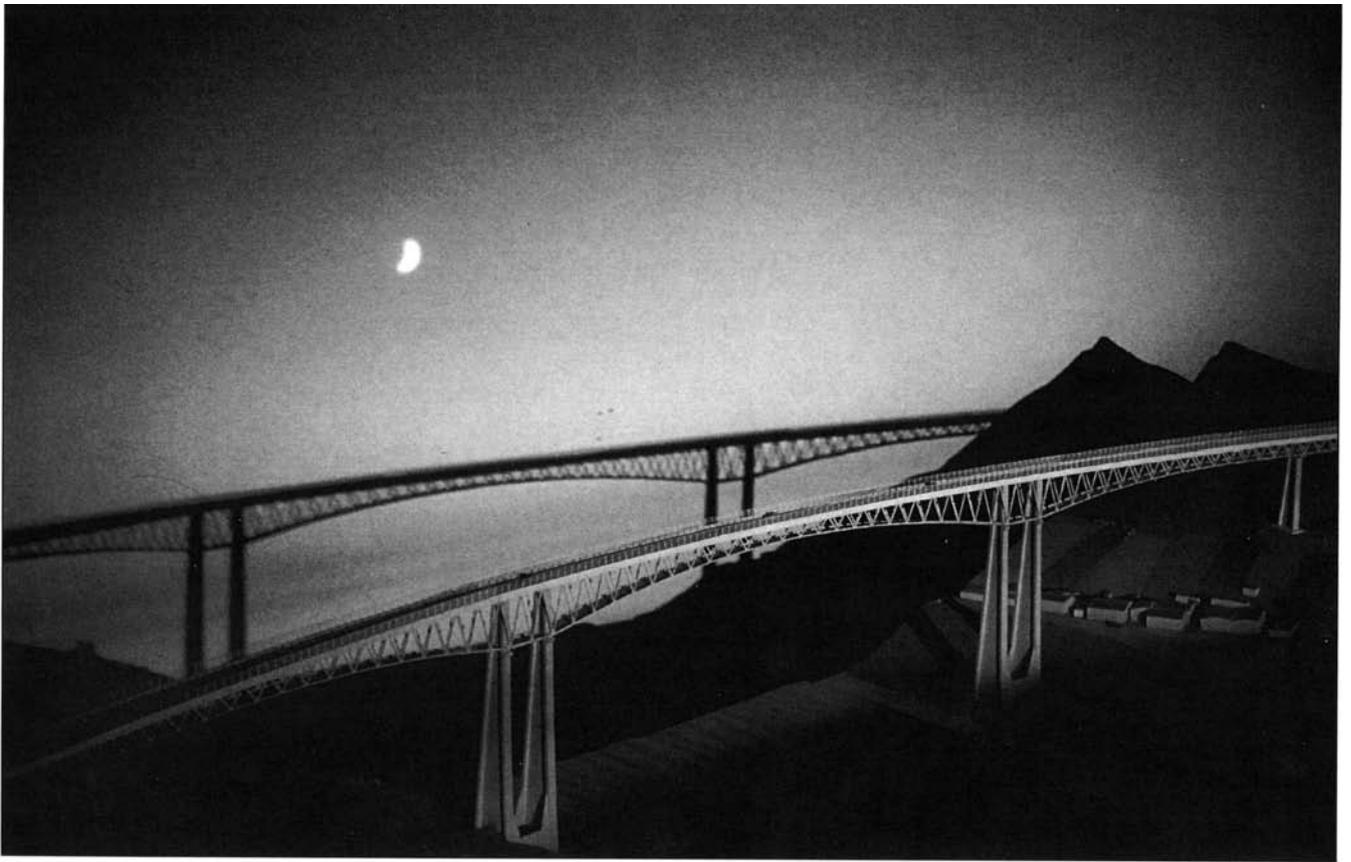


FIG. 4 : MAQUETTE D'UN PONT À TREILLIS

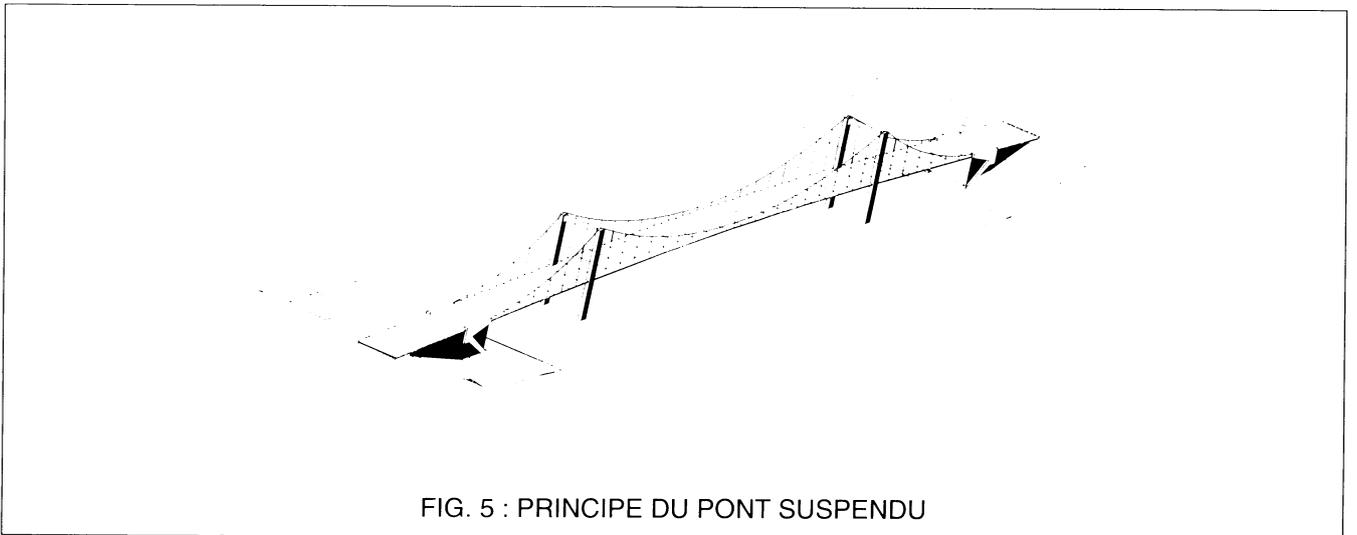


FIG. 5 : PRINCIPE DU PONT SUSPENDU

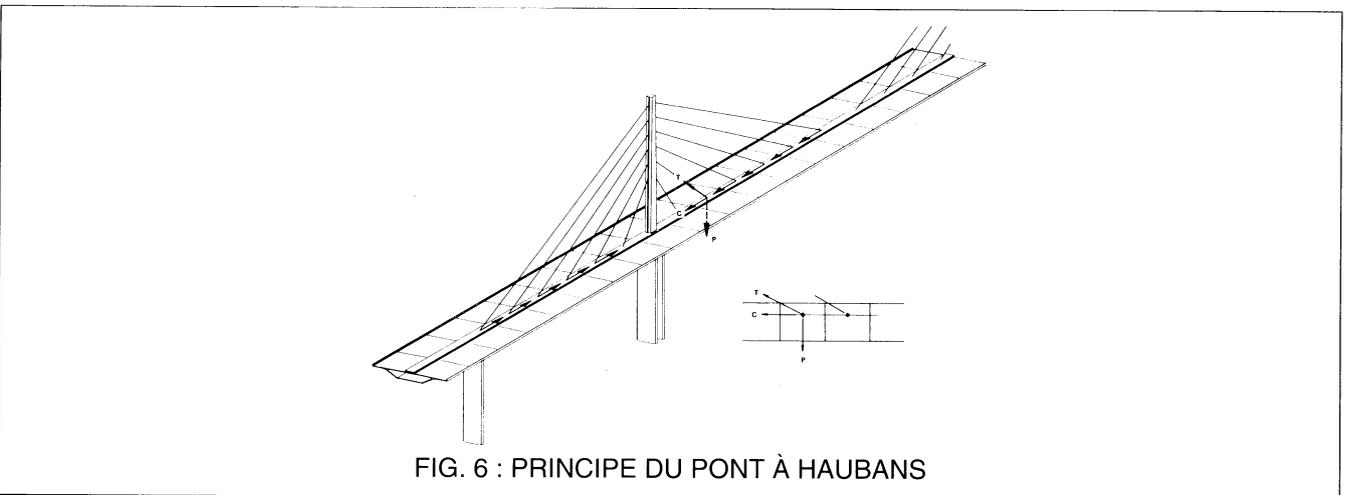
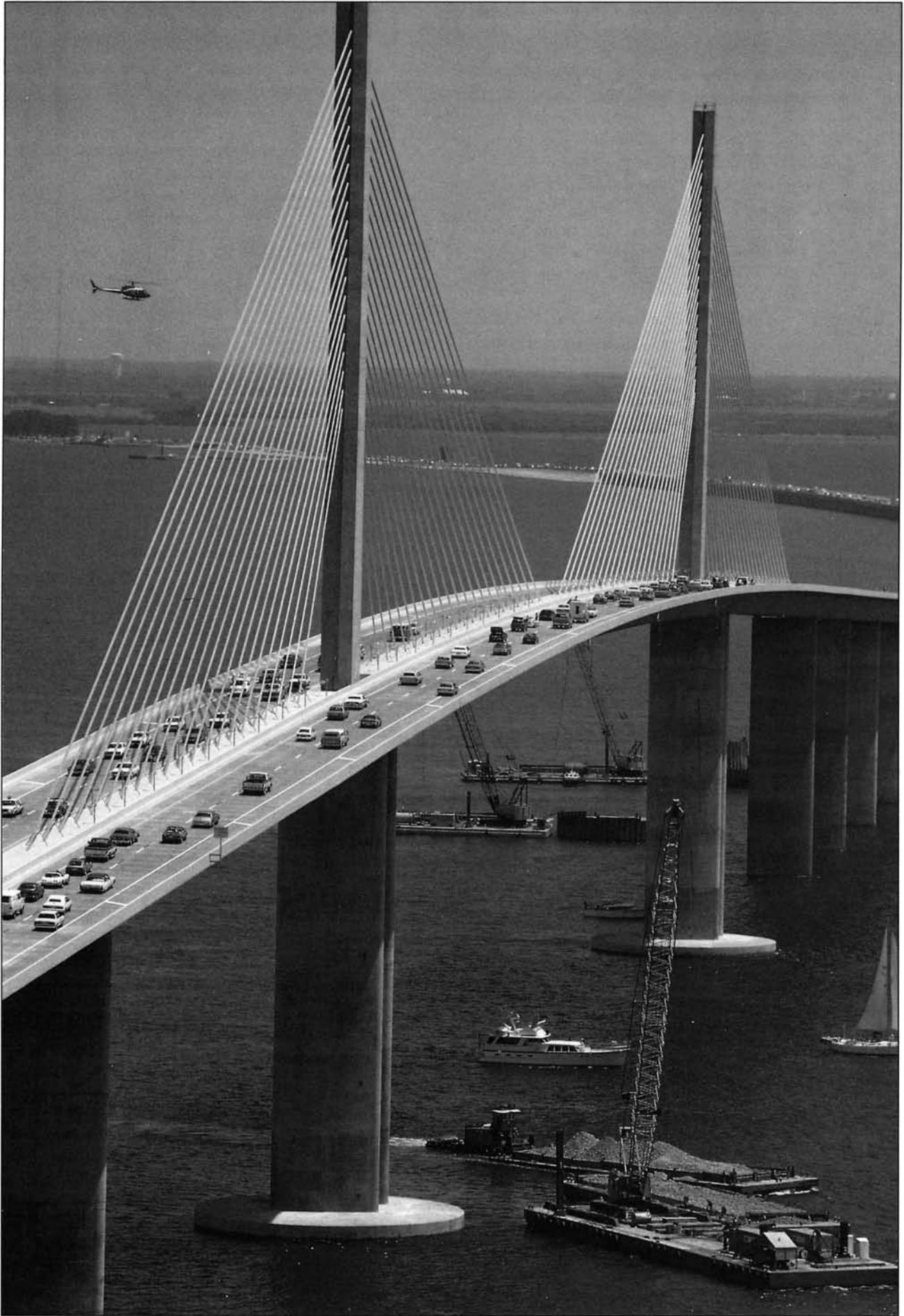


FIG. 6 : PRINCIPE DU PONT À HAUBANS



Le pont de Tampa en Floride

qui peuvent être en acier ou en béton. Cette structure a la même rigidité et la même résistance que la poutre traditionnelle, mais elle est deux fois plus légère, de sorte qu'avec les mêmes matériaux on peut franchir des portées libres de 500 m au lieu de 300 m, à des coûts de construction qui restent acceptables.

Pour les portées supérieures, il faut se tourner vers les structures tendues, dont le symbole est le pont suspendu (fig. 5). A ce jour, tous les ouvrages au monde d'une portée supérieure à 500 m sont des ponts suspendus, le record de portée libre de 2 000 m étant en cours de construction au Japon.

Dans un pont suspendu, le tablier est soutenu à intervalles réguliers par des câbles verticaux (appelés suspentes) reliés à un câble principal (ou habituellement deux câbles situés de part et d'autre du tablier) ancré à ses extrémités et passant au-dessus des pylônes qui encadrent la brèche à franchir. La forme du câble (une chaînette voisine d'un cercle) s'équilibre automatiquement pour supporter les charges de l'ouvrage. Au passage des charges (camions ou trains), la forme de la chaînette s'adapte pour assurer l'équilibre, tandis que la rigidité du tablier amortit les variations trop brusques des flèches verticales. Il n'en demeure pas moins que les ponts suspendus restent des structures très déformables, sauf à considérablement rigidifier le tablier.

Une autre structure tendue, apparue il y a maintenant quarante ans, est le pont à haubans multiples. Le principe en est sensiblement différent. Le tablier est soutenu à intervalles réguliers, non plus par des suspentes verticales, mais par des câbles obliques qui s'ancrent à leur partie supérieure dans le pylône à des niveaux successifs (fig. 6). Pour assurer l'équilibre, les haubans de la travée principale sont associés aux haubans symétriques de la travée latérale, de sorte que les charges de l'ouvrage (P) sont supportées par les efforts de traction des haubans (T) et un effort de compression (C) appliqué au tablier, dont la valeur cumulée atteint son maximum au droit du pylône.

De nombreux ouvrages, aussi variés qu'élégants, ont été construits selon ce principe, qui présente plusieurs avantages :

- la structure est beaucoup plus rigide que celle d'un pont suspendu, puisque la maille de l'ossature est une succession de triangles par essence même indéformables ; en pratique, on peut réduire les flèches maximales dans le rapport de 3 à 5 ;
- la construction se réalise aisément, de façon symétrique par rapport aux pylônes, avec une grande sécurité vis-à-vis des effets du vent pendant les travaux ;
- les matériaux étant mieux utilisés, le coût de construction est réduit, surtout pour les ouvrages de grande portée.

En contrepartie, le tablier est soumis à d'importants efforts de compression, ce qui limite la portée maximale à 1 000 ou 1 200 m avec les matériaux actuels.

Nous avons réalisé le pont de Brotonne sur la Seine (portée de 320 m) puis celui de Tampa en Floride (portée de 370 m), tous deux en béton (voir p. 279). De tels ouvrages se prêtent à une recherche patiente des meilleures formes au stade de la conception. Une illustration est donnée par l'évolution du projet de pylône du pont de Baytown, conçu pour porter deux tabliers à six voies de circulation chacun. La dernière forme a été finalement adoptée pour la réalisation de l'ouvrage, mais associée à un tablier métallique.

Le dernier ouvrage important auquel nous avons participé est le pont sur l'Isère de l'autoroute A 49, dont la double particularité est :

- la forme du tablier profilé comme une aile d'avion pour minimiser les efforts de vent,

- la nappe de suspension disposée dans le terre-plein central du tablier, et dont tous les haubans convergent au sommet d'un pylône unique.

Le record de portée des ouvrages haubanés sera acquis par le pont de Normandie sur la Seine, en cours de construction, d'une portée centrale de 856 m, et dont le tablier est en acier.

Pour franchir en sécurité de grandes portées, il faut associer la rigidité à la légèreté. Si l'acier doit constituer l'essentiel de l'ossature résistante, il ne faut pas négliger l'intérêt du béton à haute résistance, dont le rapport résistance/densité approche de celui des meilleurs aciers :

- béton : $1\,000\text{ kg/m}^3/2,5 = 400$,

- acier $4\,000\text{ kg/m}^3/7,8 = 500$,

avec une rigidité en faveur du béton.

En cherchant dans la voie d'une association nouvelle du béton à haute résistance et de l'acier, pour réaliser des tabliers haubanés de grande portée, nous avons mis au point une structure innovante dont le principe, très simple, est le suivant :

- le tablier, qui porte la chaussée ou les voies, est constitué de dalles minces en béton précontraint à haute résistance reposant sur des poutres métalliques transversales (appelées pièces de pont) ;

- la membrure inférieure longitudinale de l'ossature est un tube unique (éventuellement rempli de béton dans les zones où les efforts de compression sont importants) ;

- la liaison entre ces deux membrures est assurée par des diagonales (en tube d'acier) formant une succession de pyramides pour constituer à la fois en élévation et en profil transversal la juxtaposition la plus simple de triangles indéformables.

Pour valider le principe de cette ossature, nous avons construit près de Grenoble un pont expérimental (voir p. 281) qui peut être considéré comme le modèle à échelle réduite d'un très grand pont à haubans. Un programme d'essais complet sur un corps d'épreuve a confirmé la résistance statique et dynamique du tablier, dont la rigidité est même supérieure à celle de nos calculs.

La voie s'ouvre donc pour une nouvelle famille de ponts à haubans, et le franchissement de la vallée profonde de l'Ebron sur l'autoroute A 51, entre Grenoble et Sisteron, pourrait permettre une première application.

Il n'en demeure pas moins que le principe actuel des ponts à haubans ne permet pas d'atteindre les portées maximales permises par les ponts suspendus. L'effort de compression créé dans un tablier haubané par l'équilibre des charges et des haubans croît au moins proportionnellement avec la portée, jusqu'à atteindre l'épuisement de la résistance des matériaux ; ce qui limite le domaine d'application du procédé. Nous avons trouvé le moyen de dépasser largement cette limite en faisant appel aux ponts bi-haubanés. Une première famille de haubans permet d'atteindre une longueur de tablier de 500 m au moins de part et d'autre des pylônes, suivant le même schéma que les ponts traditionnels. La partie centrale de la travée principale est alors suspendue à des haubans formant la deuxième famille. Chaque hauban, dévié au-dessus des pylônes, est prolongé au-delà de l'extrémité du tablier pour s'ancre au sol dans un massif indépendant ; bien que de dimensions plus modestes, ce massif d'ancrage est comparable à celui d'un pont suspendu. Les haubans de la seconde famille, symétriques deux à deux par rapport au centre de la grande travée, vont maintenant créer un effort de traction dans le tablier, à la différence des haubans de la première famille qui créent toujours un effort de compression.



Pont sur la Roize près de Grenoble. Vue d'ensemble du tablier.

Pour tirer tout le parti du principe du bi-haubanage, il est prévu de créer dans le tablier central une précontrainte longitudinale destinée à compenser la traction créée par les haubans. En dosant exactement le nombre relatif des haubans des première et deuxième familles, et en harmonisant ensuite l'intensité de la précontrainte, on peut atteindre, avec le nouveau système, des portées comparables à celles des ponts suspendus, pour un coût bien moindre et surtout une rigidité beaucoup plus grande. Avec les matériaux actuels, on pourrait franchir une portée libre de 3 000 m. Mais l'occasion se présentera-t-elle de passer du stade actuel de conception à celui de réalisation ?

L'essentiel des besoins dans le domaine des ponts ne concerne toutefois pas les ouvrages spectaculaires de très grande portée, mais plutôt les viaducs urbains routiers ou ferroviaires, les passages supérieurs autoroutiers et les ouvrages répétitifs à travée moyenne.

Devant l'évolution des conditions de travail sur les chantiers, l'amélioration de la qualité et la réduction des coûts d'investissement et d'entretien passeront dans l'avenir par la production en usine de composants fabriqués industriellement (d'acier ou de béton), pour réduire, simplifier et accélérer les opérations sur le site. Introduire l'intelligence artificielle dans les ouvrages de génie civil est aussi une autre préoccupation.

Pour les ouvrages exceptionnels, les associations nouvelles de matériaux à caractéristiques élevées permettent de concevoir des ponts qui n'étaient pas envisageables il y a quelques décennies. L'extraordinaire développement de l'informatique scientifique rend possible l'analyse précise de ces nouveaux ouvrages à des coûts raisonnables.

Toutefois, ce qu'écrivait Rudyard Kipling il y a quatre-vingt-dix ans, dans *les Bâtisseurs de ponts*, paraît, en cette fin de siècle, d'une étonnante actualité :

« A l'instant même où il équilibrerait tout à coups de table de multiplication, la rivière forait peut-être des trous à la base de quelqu'un de ces piliers de quatre-vingts pieds qui portaient sa réputation. »

La table de multiplication est remplacée par l'ordinateur. Prenons garde toutefois que la rivière qui affouille les piles des ponts ne soit pas le flot de tous les codes et prescriptions internationaux et la surabondance des calculs qui en découlent. Ceux-ci ne pourront jamais se substituer à l'expérience et au bon sens pour rendre bon un mauvais projet. Les ouvrages les plus massifs sont rarement les meilleurs, lorsque des marges inutiles et quelquefois nuisibles ne sont en réalité qu'un voile à la peur des responsabilités.

Notre activité n'est certes pas exempte de risques, mais ceux-ci sont très limités dès lors qu'on applique toutes les connaissances acquises, en particulier, à travers ses propres erreurs ou celles des autres. La seule chose impardonnable est de répéter sciemment ou par négligence les erreurs du passé.

En définitive, seules la persistance et la détermination comptent, et rien ne remplace l'énergie infatigable, le courage moral et la probité intellectuelle. Telle était la grande leçon apprise auprès de Freyssinet, et qui doit être transmise maintenant à la génération qui se lève. Tout ce qui a pu être fait pendant près d'un demi-siècle à travers ce bref panorama n'est, en vérité, que le prolongement de l'œuvre et du rayonnement de ce grand constructeur.

Note

1. Toutes les études de conception et de détail ont été faites par J. Muller International à San Diego, Californie.