

# La construction du Viaduc de Millau : les défis techniques, les enjeux humains

LES NOUVEAUX DÉFIS

Le viaduc de Millau est un chaînon vital de l'A75 entre Paris et l'Espagne. Franchissant la large et profonde vallée du Tarn, cette autoroute est la plus haute de France. Le viaduc représente un exploit technique avec ses 6 travées principales de 342 m suspendues à sept pylônes et une avancée considérable dans la conception des ponts haubanés. Sa désormais célèbre silhouette offre à la ville de Millau un nouvel attrait touristique. En effet, le grand public perçoit que, par cet ouvrage hors du commun, l'histoire de sa construction est peut être la plus formidable épopée de l'ingénieur moderne.

Par **Marc BUONOMO**, Directeur de la Division Ponts et Ouvrages d'Art, Eiffel

**L**e Viaduc de Millau était un défi pour les ingénieurs et pour les entreprises qui se présentaient pour répondre à l'appel d'offre. A l'époque, beaucoup de monde trouvait ce projet pharaonique et était dubitatif devant la construction d'un tel ouvrage.

Ce dernier se situe dans un milieu montagneux et le tablier se trouve à 300 m au-dessus du Tarn avec des piles de 245 m de haut. Rappelons que la Tour Eiffel mesure 300 m. Toutes les dimensions de l'ouvrage étaient inhabituelles

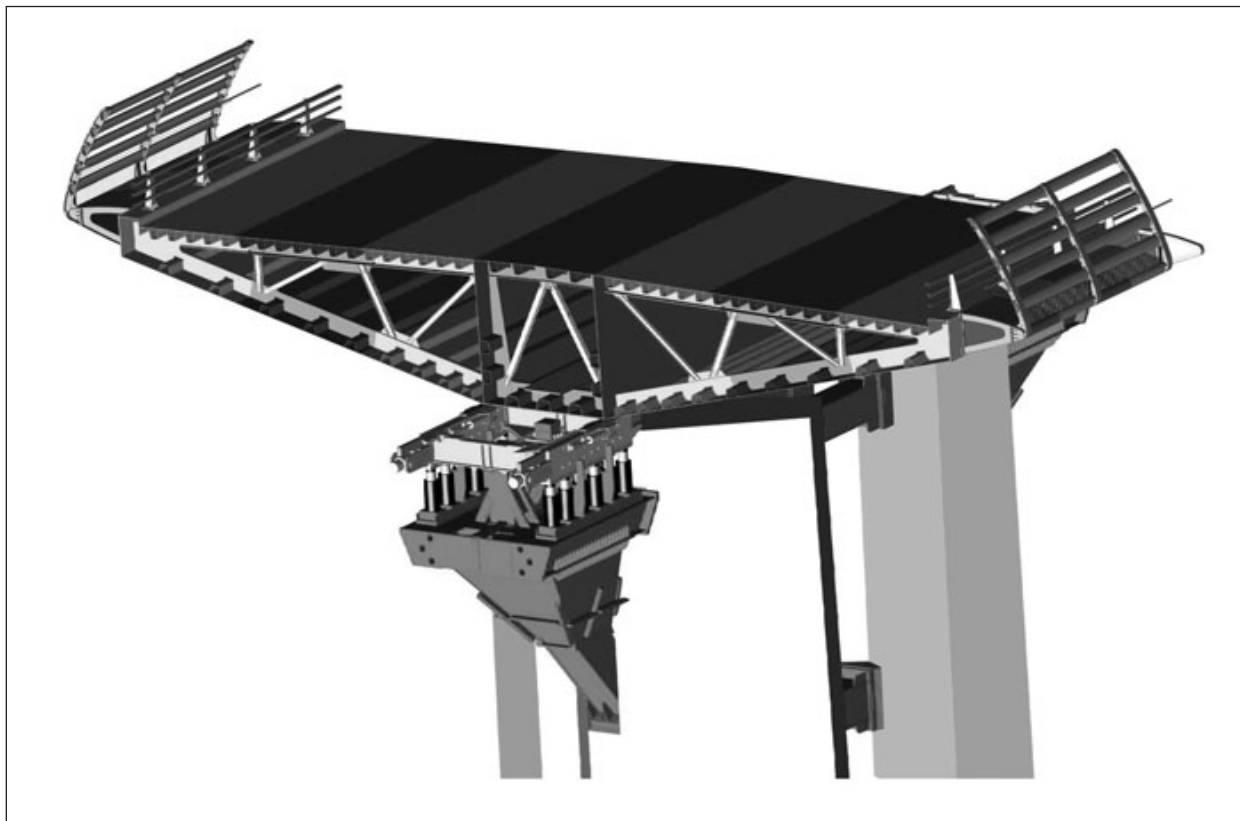
## CRÉER DES TECHNIQUES ADAPTÉES À LA GRANDEUR DE L'OUVRAGE

Pour un ingénieur, il y a deux voies pour construire : l'une consiste à faire comme d'habitude en gardant des techniques éprouvées, l'autre consiste à créer des techniques adaptées à la grandeur de l'ouvrage. C'est cette

dernière voie qui a été choisie. Car prendre des méthodes de construction traditionnelles en construisant par encorbellement comportaient beaucoup d'inconvénients pour les hommes qui allaient y travailler et aussi pour la nature environnante.

Le chantier se situe à 700 m d'altitude dans un site de 2 400 m de large, ouvert à tous les vents. Il neige régulièrement en hiver sur le Causse du Larzac et le Causse rouge, les vents soufflent très souvent avec violence, sans compter les orages bien connus dans les Cévennes. Des météorologues m'ont dit un jour que l'endroit était fait pour les brebis mais que ce n'était certainement pas le lieu idéal pour y faire travailler des hommes.

Dans de telles conditions, nous avons cherché des méthodes qui permettent aux hommes d'être le moins exposés aux intempéries et aux risques dus à la hauteur. Les solutions traditionnelles auraient conduit à détruire le paysage à l'aplomb du viaduc. Ces destructions auraient été faites par l'implantation d'ancrages gigantesques pour maintenir le tablier à 300 m au-dessus du



D.R.

**Figure 1** – La méthode de poussage traditionnelle était inadaptée aux grandes hauteurs et aussi aux faibles raideurs des piles et des palées. C'est pourquoi les ingénieurs d'Eiffel ont choisi une méthode audacieuse et novatrice afin de mettre en place, en moins de 18 mois, les 38 000 tonnes du tablier. Dès son projet, Eiffel avait imaginé un système de lancement avec un asservissement en « en boucle fermée » entièrement informatisé et doté d'un bus de communication de 2000 mètres. Ce système permet de refermer les efforts en tête de pile ou de palée et ainsi de ne pas induire d'effort de frottement parasite comme ferait une masse qui glisse sur une surface téflonisée. Après avoir reçu la commande pour la construction de l'ouvrage métallique, Eiffel a dessiné et fait fabriquer les « translateurs ». C'est Enerpac qui a remporté l'appel d'offre et a été chargé de motoriser et de piloter les 64 appareils selon le cahier des charges d'Eiffel.

Tarn par vents ou tempêtes. L'hypothèse de tant de destruction nous a encore davantage motivés à trouver une autre solution.

C'est pour toutes ces raisons que l'acier nous est apparu comme le matériau le plus approprié par sa légèreté et sa flexibilité.

Nous avons imaginé la construction du tablier du pont sur les plateformes en arrière des culées et un poussage sur palées provisoires. Cette option nous conduisait à avoir sur le chantier 96 % des heures travaillées à 5 m de hauteur maximum au lieu d'exposer le personnel à la hauteur et aux vents. Tout s'est passé comme en usine avec des ponts roulants de 10 m de hauteur et des abris pour travailler à l'abri des intempéries.

Pour les palées provisoires, il en a été de même.

La plus haute palée mesure 180 m. Pendant la construction de ces ouvrages de 1 300 T, personne n'est monté à plus de 12 m de hauteur au dessus du sol. Nous avons utilisé un système de télescopage qui consiste en une cage dotée de vérins qui permet de hisser la tour depuis le sol : les palées ont été construites ainsi 12 m après 12 m.

L'idée principale de pousser le tablier sur des palées provisoires et sur les piles, dont la plus haute mesurait 245 m de haut, n'aurait pas été possible sans l'invention des

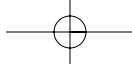
translateurs. Quand on pousse un objet sur une surface il se crée une force de frottement qui agit sur la surface. Dans notre cas, le tablier allait reposer sur 64 appuis glissants, les efforts verticaux mis en jeu étaient de 7 000 T sur une palée ou une pile soit l'équivalent du poids de la Tour Eiffel sur un seul point.

Il paraissait évident que le poussage de telles charges allait provoquer le renversement des piles. Pour contrer cet inconvénient, les translateurs qui ont des efforts refermés sur eux-mêmes ont permis de pousser un tablier de 1 700 m de long et un poids de 30 000 T sans introduire d'effort horizontal dus aux frottements sur la tête des piles et des palées.

Les 64 translateurs constituaient une seule machine de 1 700 m numérisée. C'est certainement la plus grande machine hydraulique numérisée au monde.

Pour se faire une idée de cette machine il faut se représenter un mille-pattes qui avance. Dans notre cas, le mille-pattes avait 1 700 m de long et pesait 30 000 T. Il est intéressant de penser que le principe de la machine de translation n'a pas de limite en longueur et en poids. Un principe qui laisse aux architectes des perspectives intéressantes.

Le tablier mis en place, il fallait construire les pylônes : chaque pylône mesure 90 m de haut.



MARC BUONOMO

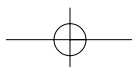
Figure 2 – Le tablier a commencé son dernier parcours de 171 m.

D.R.



D.R.

Figure 3 – Le chantier a été alimenté en flux tendu par une noria de camions. 2 000 transports ont été nécessaires pour amener à pied d'œuvre les 45 000 tonnes d'aciers pour la construction.





D.R.

Figure 4 – L'acier, c'est flexible !

Là aussi, une méthode innovante permet d'économiser force et temps. Nous avons choisi de fabriquer les pylônes en usine, de les assembler au sol et après les avoir amenés à pied d'œuvre, de les mettre à la verticale comme des obélisques. Le relevage de chaque pylône a pris cinq heures et tous les pylônes ont été relevés en cinq semaines après avoir terminé la mise en place du tablier.

#### Une chaîne de fabrication entièrement assistée par ordinateur

La construction ne se limite pas aux choix du chantier. Quand il s'agit d'acier, la construction commence par une fabrication en usine. Compte tenu de la longueur du tablier et de son tonnage, les méthodes habituelles n'auraient pas permis de sortir l'ouvrage dans un délai acceptable. Pour aller vite et bien, il fallait innover et se doter de machines de fabrication les plus performantes. Ainsi, nous avons organisé une chaîne de fabrication entièrement assistée par ordinateur.

Notre chaîne comportait à chaque étape un outil flexible. Le découpage était robotisé, les soudages les plus complexes étaient exécutés par des robots et le contrôle était exécuté par un appareil optique automa-

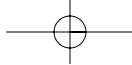
tisé. Ce ne sont que trois exemples parmi beaucoup d'autres.

Cette révolution dans les ateliers a été possible grâce à la flexibilité des équipements et à leur simplicité d'utilisation. Les hommes s'habituent facilement aux nouvelles technologies si elles leur simplifient le travail et on a l'habitude de dire qu'un bon ouvrier a toujours de bons outils.

Pour nous, dans les ateliers, cette mise en route a été facile car elle a été faite par des ouvriers qualifiés. Il a été remarquable de voir que très rapidement toutes les machines, dont les plus complexes à 16 axes de commande numériques, ont été prises en main par des gens qui n'avaient jamais eu de console en main de leur vie. *A posteriori* nous pouvons dire qu'après l'appréhension d'être mis sur une grosse machine, chaque opérateur a rapidement été fier d'avoir à commander une belle machine qui fait du beau travail. On peut dire aussi que les machines ont gagné en capacité et que le dialogue homme – machine est devenu considérablement plus simple.

Au début du projet, il était de notoriété publique que le délai que nous affichions de 42 mois était irréaliste. Au fil des mois, les hommes d'usine et du chantier ont montré que 39 mois était un objectif réalisable. Mais, porté par une foi inébranlable, l'ouvrage a été construit en 38 mois. Ce délai a beaucoup étonné les professionnels.





Le gouverneur de Californie, Arnold Schwarzeneger, a envoyé une délégation visiter le chantier et elle a été très intéressée par les mesures constructives et organisationnelles qui ont conduit à la maîtrise technique et à la maîtrise du délai.

UNE CULTURE  
GÉNÉRALISTE  
ET ENCYCLOPÉ-  
DIQUE EST  
INDISPENSABLE  
POUR  
L'INGÉNIEUR  
CONSTRUCTEUR

Créer, innover, c'est souvent du travail personnel ou celui d'une petite équipe. Dans notre cas, l'équipe décisionnelle comportait cinq personnes dont les expériences étaient très diverses. Mais si l'ingénieur imagine ce qu'il va faire faire par ses équipes, ce sont toutes les équipes qui lui donnent des centaines de mains et des centaines de réflexions. Ce sont ces équipes qui font avancer le travail et quoi de plus gratifiant de s'entendre dire : « On sait que vous êtes sur le chantier et que s'il y a un problème, il n'y a qu'à vous appeler sur la radio de chantier ».

L'ingénieur constructeur d'ouvrages d'art est certainement un des métiers pour lequel il faut avoir une vocation. Je pense qu'on naît programmé pour faire ce métier. J'ai rencontré beaucoup d'ingénieurs dans le métier et tous avaient en commun cette passion de construire depuis la plus tendre enfance.

Construire un ouvrage d'art, c'est innover à tout instant. L'ingénieur constructeur doit avoir la culture scientifique la plus généraliste possible, la plus encyclopédique. Ce n'est pas lui qui réalise les choses de ses mains, ce sont des équipes, celles de son entreprise ou celles de ses fournisseurs.

Dans un projet d'ouvrage d'art, de la nature du Viaduc de Millau, les techniques utilisées sont nombreuses : des choix des techniques, aux calculs, aux essais en

soufflerie, au soudage, à l'hydraulique et, enfin, à toutes les technologies numériques... la liste est longue. Et c'est grâce à une grande connaissance des différents métiers que le dialogue avec des ingénieurs spécialisés pourra être fructueux.



Figure 5 – Le pylône est mis debout.

D.R.

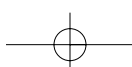
Et nous avons aussi aujourd'hui pour construire des techniques beaucoup plus performantes :

- le calcul numérique qui permet dans des temps record de faire tourner des modèles qui vont dans le détail et qui permettent de visualiser ce qu'Eiffel et les ingénieurs qui nous ont précédé ne pouvaient constater qu'in situ ;
- l'électricité et sa puissance ;
- l'hydraulique haute pression ;

Si on examine les grandes constructions humaines, on peut en tirer une conclusion : les hommes qui construisent emploient toutes les technologies connues du moment. Mais toutes ces technologies ont toujours été employées avec une dose d'ingéniosité et une grosse dose de bon sens paysan.

On découvrera bientôt que la construction des grandes pyramides a été un chef d'œuvre d'ingéniosité d'un ingénieur et d'une équipe qui avaient un bon niveau de connaissances des matériaux et de la mécanique.

Au XIX<sup>e</sup> siècle, Gustave Eiffel découvrait l'art de construire en fer. Il a construit avec le matériau et les ou-





D.R.

Figure 6 – Le viaduc avec ses haubans.



D.R.

Figure 7 – Il aura fallu 38 mois pour construire le grand viaduc de Millau. Peu y croyaient ! Il a été le premier ouvrage d'art à utiliser toutes les ressources du microprocesseur. Il se révèle comme une référence pour ses méthodes de construction. Du calcul à la construction sur site, les ingénieurs ont utilisé tous les systèmes informatisés, les ordinateurs pour contrôler, le GPS pour assurer le déplacement, les bus informatiques sur chantier dans le froid ou les orages.

- les asservissements et la simplicité d'utilisation de l'ordinateur qui, en quelques années, s'est glissé dans toutes les machines et à chaque étape de la construction ;
- le GPS différentiel qui permet de mesurer avec tant de précision sur de grandes distances (sur le chantier la distance entre les culées est de 2 460 m et la précision de mesure est de 3 mm.

---

### PRÉSERVER LES FORMATIONS GÉNÉRALISTES À DOMINANTE MÉCANIQUE

Alors on peut se demander quelle est la meilleure formation pour diriger ce type de projet. C'est pour moi, celle d'une école où l'on approche tous les types de métiers. En effet, les Arts et Métiers m'ont enseigné une bonne partie de ce que je sais aujourd'hui. Mais je sais aujourd'hui que bon nombre d'ingénieurs ont commencé leur formation avec le mécano, les boîtes du

petit chimiste et celles du petit électronicien. Beaucoup ont suivi des études techniques avec à la clef le bac technique.

Aujourd'hui, je regrette la disparition de ces études techniques dans le cycle seconde – première – terminale technique, qui avaient le mérite de préparer des praticiens de la mécanique.

La mécanique n'est pas morte comme certains veulent le faire croire et les besoins de l'industrie ne se résument pas qu'aux ingénieurs en informatique. Il faut donc garder ces formations généralistes à dominante mécanique.

Pour conclure, l'équipe d'ingénieurs du maître d'ouvrage, du maître d'œuvre, des entreprises et du collège d'experts qui a travaillé sur cet ouvrage a été unanime pour dire que s'il fallait le refaire il faudrait reprendre les mêmes méthodes.

Dans un siècle, ceux qui nous succéderont emploieront d'autres méthodes plus évoluées, mais je suis sûr que les ingénieurs du futur regarderont en détail ce que nous avons fait.