

VIADUC DE MILLAU

De l'idée d'un pont à sa mise en service

Georges GILLET – Chef d'Arrondissement

Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer

Jean-Claude MUTEL, Directeur

Compagnie Eiffage du Viaduc de Millau

RESUME

Résultat d'un processus initié dès 1988, le viaduc de Millau, ouvrage phare de l'autoroute A75 qui relie Clermont-Ferrand à Béziers, a fait l'objet de près de douze années d'études approfondies pilotées par la direction des routes du ministère de l'équipement.

Après que les services techniques de l'administration eurent vérifié la faisabilité d'un ouvrage d'un seul tenant pour traverser la vallée du Tarn, de nombreux architectes et bureaux d'études ont été mis en compétition pour élargir la recherche des solutions possibles.

Au terme de cette recherche, menée sous le regard attentif d'un collègue d'experts internationaux, la solution d'un viaduc multiaubané a été retenue par le ministre de l'équipement et étudiée de manière très approfondie.

C'est à l'issue de cette phase et après un appel d'offres international que la construction et l'exploitation de cet ouvrage ont été concédées à la Compagnie Eiffage du viaduc de Millau.

Plus que tout autre, cet ouvrage exceptionnel, pour la construction duquel les entreprises mettent en œuvre les procédés innovants, a fait l'objet d'une attention constante des services de l'Etat pour que soient garanties sa sécurité et sa pérennité.

VIADUC DE MILLAU

Du choix du tracé et de la conception de l'ouvrage à sa mise en concession Par Georges Gillet

CHAPITRE 1 : L'Autoroute A 75

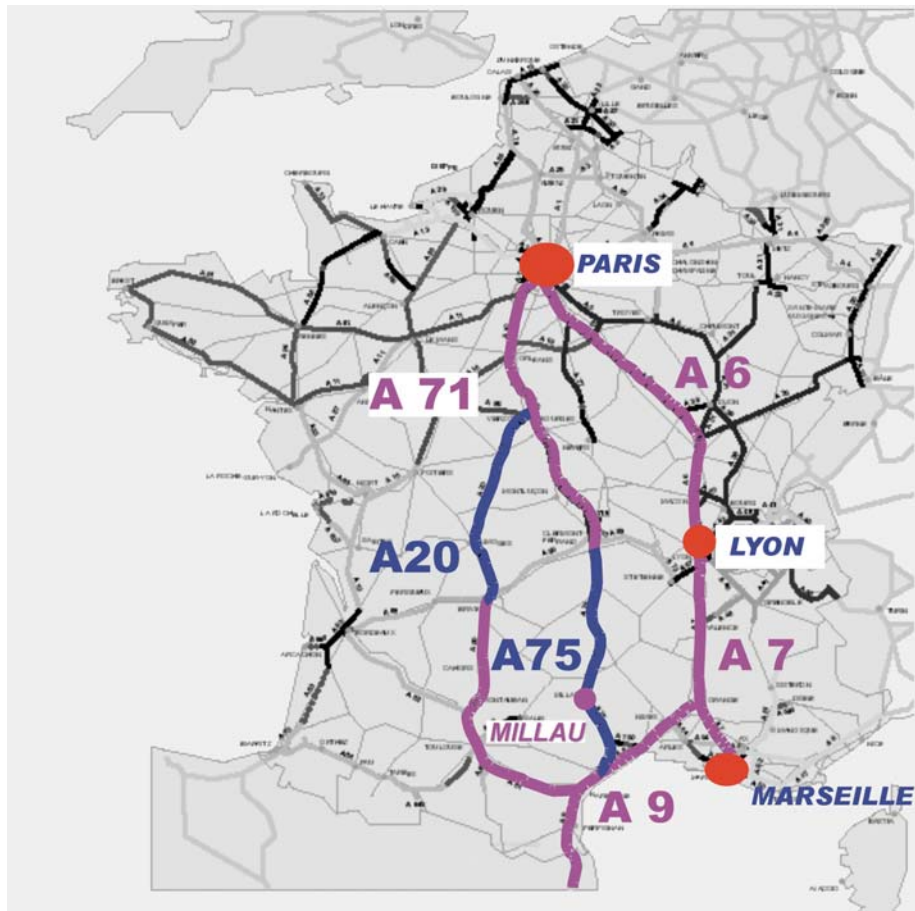
L'A75 Clermont Ferrand – Béziers est représentative de la nouvelle génération des autoroutes. Elle a fait l'objet d'études multiples et approfondies pour optimiser la sécurité des usagers, s'inscrire le plus naturellement possible dans les paysages traversés, apprivoiser une géographie sinueuse, accidentée, et des terrains géologiques fragiles, irriguer un territoire encore insuffisamment desservi et favoriser son développement économique.

Sur un parcours de 340 Km environ, l'automobiliste traverse 6 départements dans des conditions optimales de sécurité : le Puy de Dôme, la Haute Loire, la Lozère, le Cantal, l'Aveyron et l'Hérault.

Ce nouvel axe de transit facilite les trajets entre l'Europe du Nord et la région Parisienne d'une part et l'Espagne et l'ouest de la façade méditerranéenne d'autre part.

De plus, l'A 75 propose une alternative aux autoroutes de la vallée du Rhône très surchargées au niveau du trafic.





L'A75 : l'autoroute des ouvrages d'art exceptionnels

L'A75 illustre les savoir-faire des services du ministère de l'Équipement. Elle présente la particularité d'être la « plus haute » de France. Sur 150 km, l'automobiliste roule à plus de 800 mètres d'altitude et sur environ 50 km, même au-dessus de 1000 mètres !

Cette autoroute compte de nombreux ouvrages d'art exceptionnels dont le pont le viaduc de Millau.

L'État a fait le choix de réaliser une autoroute non concédée sur plus de 340 km, afin de faciliter le développement économique et touristique de l'est du Massif Central. Excepté le viaduc de Millau, l'A75 est une autoroute gratuite. L'État en est le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre

Ses aires de services et de repos, véritables vitrines des régions traversées, ont fait l'objet d'une attention toute particulière. Des architectes, des paysagistes, des représentants de collectivités locales et d'associations de riverains ont été associés à leur réalisation.

Des échangeurs situés en moyenne tous les 10 km permettent aux usagers d'entrer et de sortir de l'A75 sans contrainte et ainsi de bien irriguer le territoire.

Commencée en 1988 et sa réalisation s'est étalée sur plus de 17 ans.

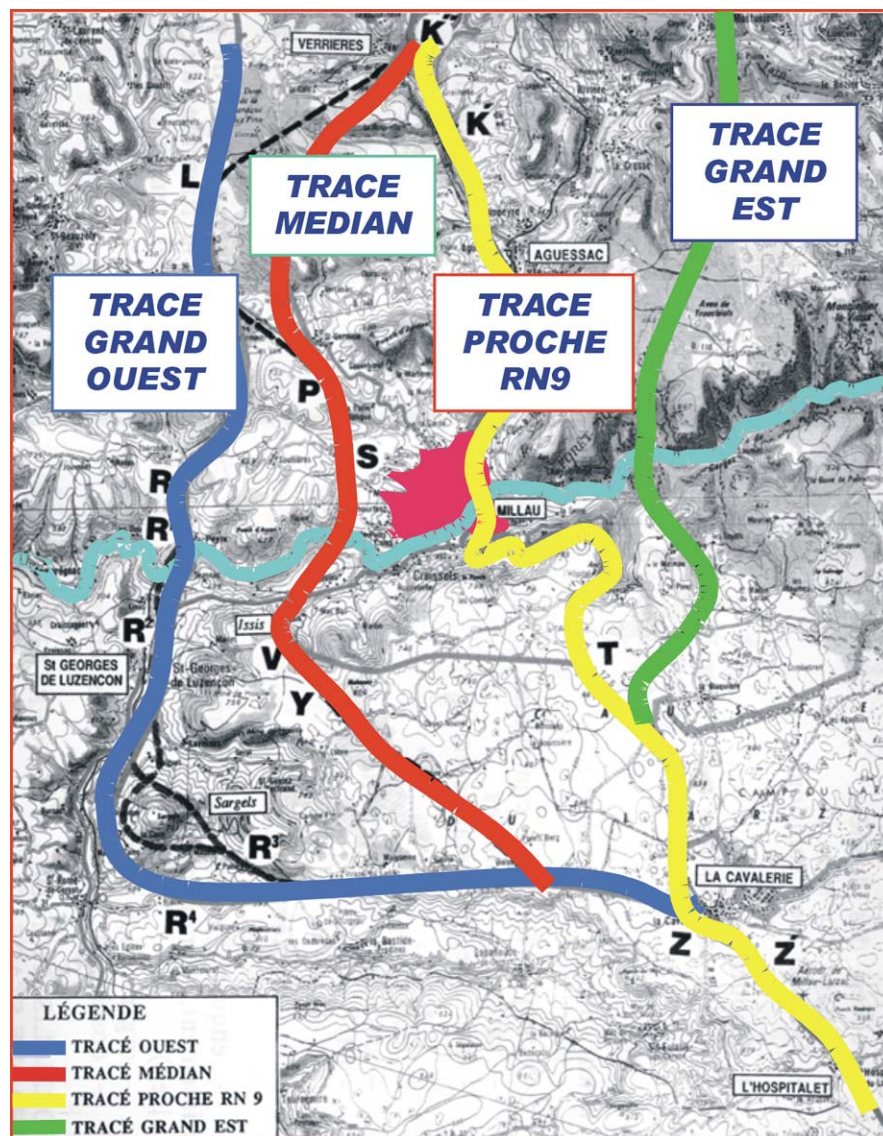
CHAPITRE 2 : «Le contournement de Millau, genèse d'un projet d'exception»

Près de 10 ans ont été nécessaires avant d'aboutir au tracé du contournement de Millau et au projet du viaduc. Le franchissement de la vallée du Tarn à proximité de Millau a sans aucun doute constitué le défi technique le plus important pour les concepteurs de l'autoroute A75.

1988 – 1989 : Plusieurs tracés sont étudiés pour contourner Millau

Quatre options de passage de l'A75 au droit de Millau sont initialement envisagées.

- Une option dite « grand Est » passant à l'est de Millau et franchissant à grande hauteur les vallées du Tarn et de la Dourbie par l'intermédiaire de deux grands ponts (portées de 800 à 1 000 m). Sa construction aurait été difficile. Cette option n'aurait permis d'accéder à Millau qu'à partir du plateau du Larzac en utilisant la longue et sinueuse descente de La Cavalerie. Bien que plus courte et plus favorable pour le trafic de transit, elle est abandonnée car Millau et sa région n'auraient pas été desservis de façon satisfaisante ;
- Une option dite « proche de la RN9 » desservant bien Millau, mais présentant des difficultés techniques et ayant un fort impact sur le milieu bâti existant ou projeté. Elle est également abandonnée ;
- Une option dite « grand Ouest », plus longue que la précédente d'une douzaine de kilomètres, empruntant la vallée du Cernon. D'une réalisation technique plus aisée, cette solution aurait des impacts importants sur l'environnement, notamment pour les villages pittoresques de Peyre et de Saint-Georges-de-Luzançon. Plus onéreuse que la précédente et desservant mal le Millavois, cette option n'est pas non plus retenue ;
- Enfin, une option dite « médiane » à l'ouest de Millau bénéficiant d'une assez large approbation locale mais présentant des difficultés de réalisation d'ordre géologique, notamment au niveau du franchissement de la vallée du Tarn. Les investigations des experts concluant à la possibilité de les surmonter, cette option est choisie par décision ministérielle le 28 juin 1989 parce qu'elle assure une bonne desserte de Millau et respecte l'environnement.



Franchir la vallée du Tarn, mais comment ?

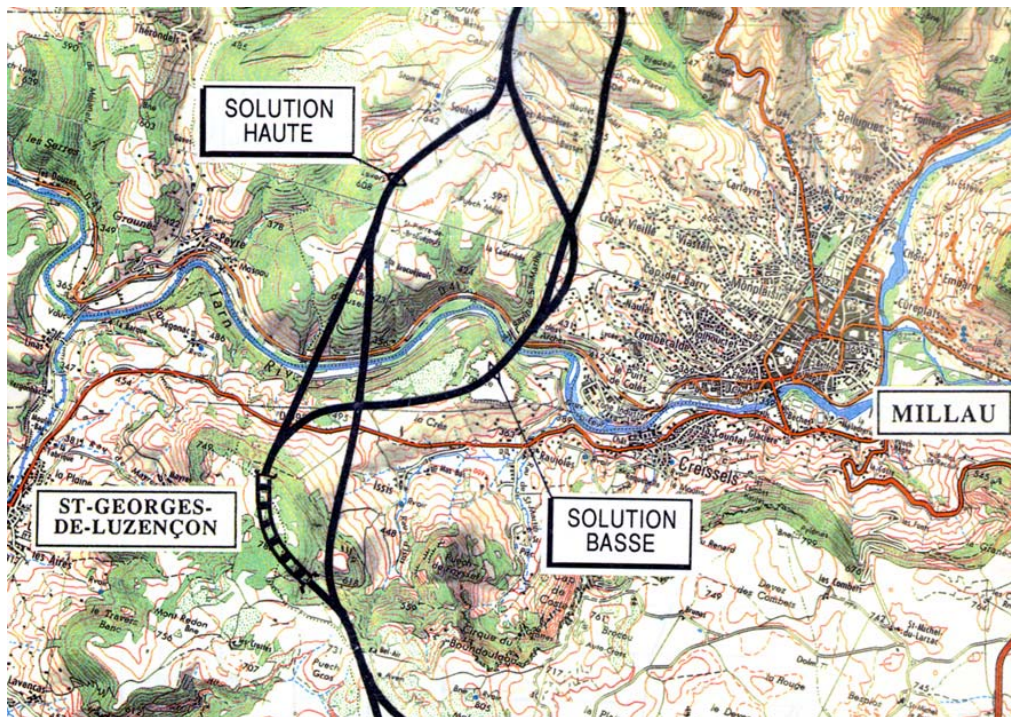
1990 – 1991 : Le choix entre solution « haute » et solution « basse »

Une fois le choix du tracé effectué, deux familles de solutions de franchissement de la vallée de Tarn sont comparées par les services du ministère de l'équipement :

- une famille « haute », faisant appel à un viaduc de 2 500 m passant à plus de 200 m au-dessus du Tarn,
- une famille « basse », descendant dans la vallée, franchissant la rivière grâce à un ouvrage de 600 m puis atteignant le Larzac par un viaduc de 2 300 m prolongé par un tunnel.

Moins longue, moins chère et offrant de meilleures conditions de sécurité pour les usagers, la famille « haute » apparaît la plus intéressante.

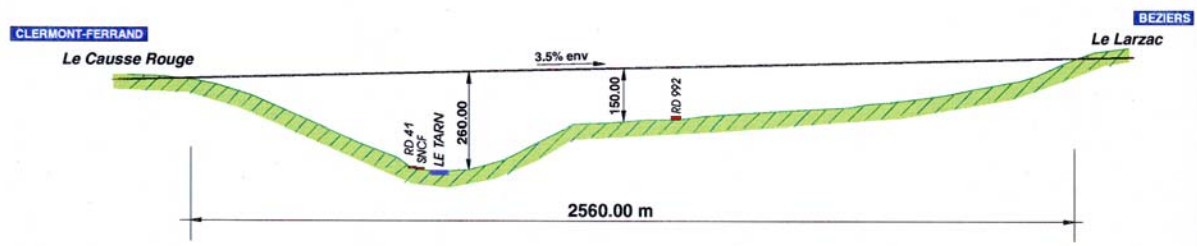
Elle est adoptée par décision ministérielle le 29 octobre 1991.



Sous la conduite de Michel VIRLOGEUX les services du ministère de l'équipement étudient les différentes solutions possibles. Ils sélectionnent sept types de franchissement incluant des variantes béton ou métal.

Ces études préliminaires permettent de valider la faisabilité d'un ouvrage franchissant la vallée à lui seul.

La décision ministérielle du 12 juillet 1993 approuve l'avant projet du contournement de Millau qui franchit le Tarn par un ouvrage de 2 460 mètres de long à 270 mètres de hauteur par rapport au fond de la vallée.



Quatre grands types d'ouvrages sont retenus :

- ⇒ une grande travée de 280 mètres de portée avec un tablier en béton précontraint de hauteur variable et des travées d'accès de hauteur constante de 150 mètres
- ⇒ la même solution avec un tablier métallique
- ⇒ des travées haubanées de 320 mètres de portée avec un tablier en béton de hauteur constante
- ⇒ une grande travée haubanée de 400 mètres de portée et des travées d'accès de 170 mètres de portée avec tablier métallique de hauteur constante.

La recherche d'un ouvrage techniquement viable

Compte tenu des enjeux techniques architecturaux et financiers, Christian LEYRIT alors Directeur des Routes a souhaité élargir le champ d'investigation des quatre solutions envisagées pour le Viaduc.

C'est ainsi qu'en 1993, la direction des routes lance un appel à idées auprès de bureaux d'étude et d'architectes et obtient sur la base des études du service du ministère de l'équipement (le SETRA) un éventail de solutions.

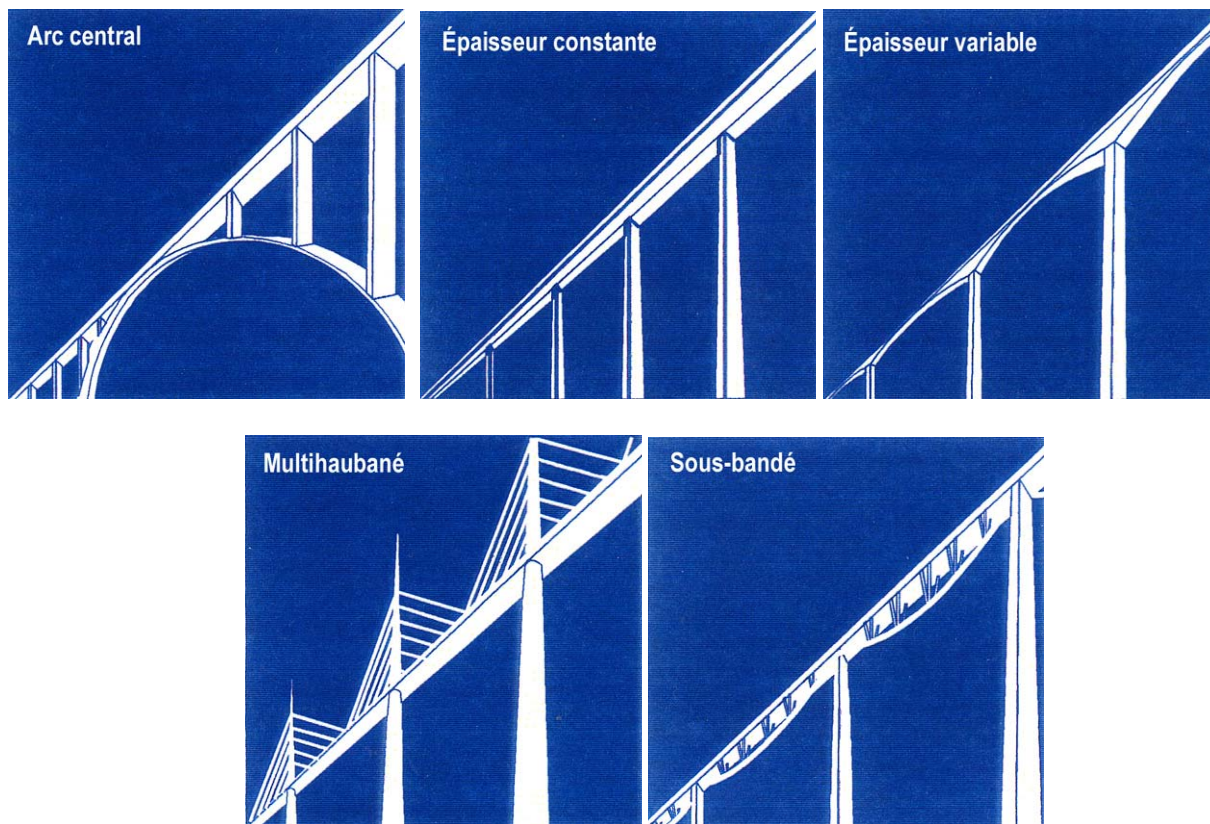
Cette recherche mobilise de nombreux spécialistes de diverses disciplines. Elle porte sur la qualité technique et esthétique de l'ouvrage, sa résistance au vent, la géologie, les matériaux utilisés (acier et béton) et la protection du paysage.

La direction des routes constitue alors un groupe d'experts qui confirment la faisabilité de la solution haute précédemment envisagée.

La mission d'expert juge indispensable d'élargir le choix de l'ouvrage à adopter en mettant en concurrence des équipes indépendantes de l'Administration et regroupant bureaux d'études et architectes chargés d'étudier chacun un projet.

L'année suivante, la direction des routes met en compétition 5 équipes, chacune travaillant sur l'une des cinq familles de solutions retenues.

- ⇒ viaduc multihabané
- ⇒ viaduc de hauteur variable
- ⇒ viaduc comportant une ou plusieurs travées sous-bandées
- ⇒ viaduc comportant un grand arc béton
- ⇒ viaduc de hauteur constante

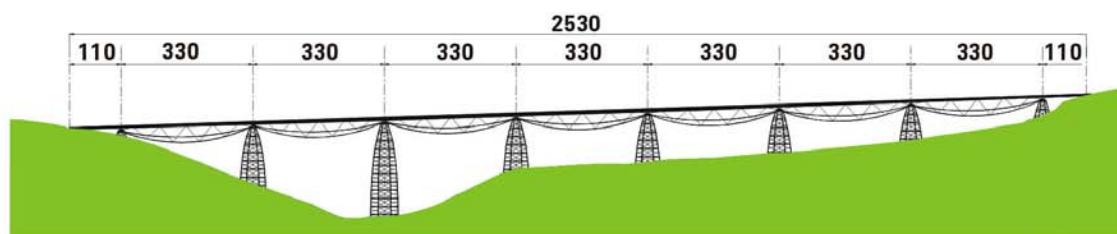


Selon Christian Leyrit, alors directeur des routes « Il fallait pour cet ouvrage hors d'échelle, mettre en compétition des équipes sur des solutions très différentes. Ce ne devait pas être seulement un concours d'esquisse, de geste architectural. Il était nécessaire d'aller très loin : la complexité du projet posait la question de sa faisabilité ».

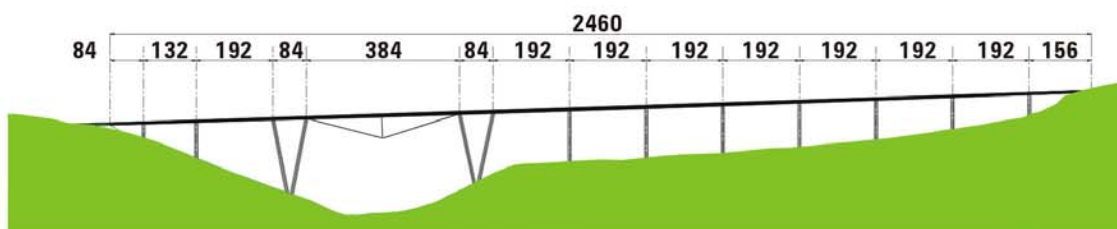
Début juillet 1996, le jury constitué d'élus, d'hommes de l'art et d'experts et présidé par le directeur des routes, propose de retenir la solution du viaduc multahaubané présentée par le groupement des bureaux d'études Sogelerg, Europe Etudes Gecti, Serf et le cabinet d'architectes Norman Foster & Partners.

Le 15 juillet 1996, le ministre de l'Equipement entérine ce choix.

Les études de détail sont menées jusqu'au milieu de l'année 1998 par le groupement lauréat, sous le pilotage de la direction des routes qui s'appuie localement sur l'arrondissement interdépartemental des ouvrages d'art (AIOA).



Viaduc "sous-bandé"



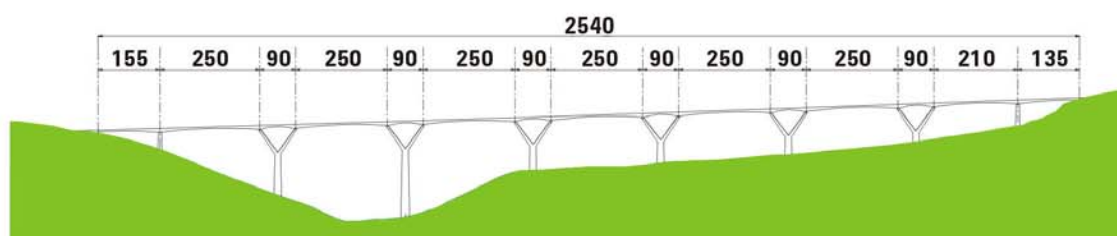
Viaduc d'épaisseur constante



Viaduc multihaubané



Viaduc en arc central



Viaduc d'épaisseur variable

CHAPITRE 3 : Les études de conception

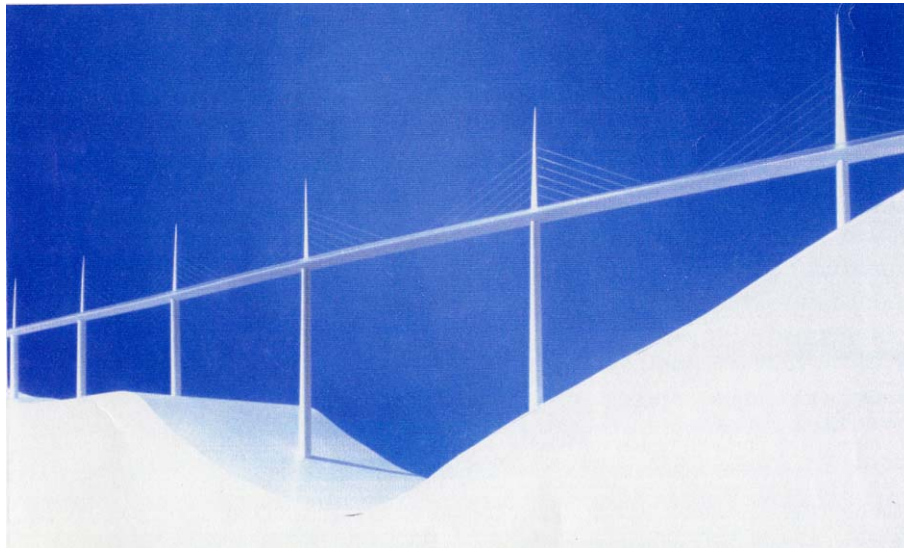
1- Conception générale

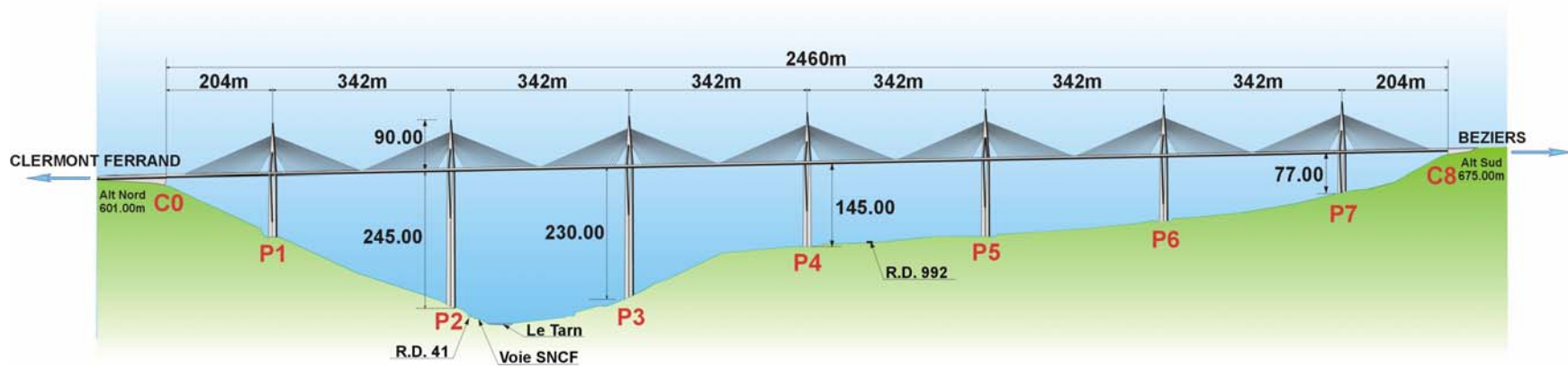
Le choix des travures et la conception générale de l'ouvrage découlent de la recherche d'une adéquation entre les contraintes du site et un certain nombre d'options techniques et architecturales.

Parmi celles-ci :

- ⇒ volonté d'affirmer que l'ouvrage relie deux plateaux franchissant une vallée très vaste sans marquer la vallée du Tarn
- ⇒ volonté de donner au franchissement un caractère d'unicité et de régularité
- ⇒ volonté de minimiser les impacts au sol et le nombre de points d'appui
- ⇒ volonté de donner des formes très épurées à la structure (continuité visuelle de l'ensemble pile – pylône)
- ⇒ volonté de sécuriser l'utilisateur (bande d'arrêt d'urgence de trois mètres, dispositif brise vent translucide, tracé en plan légèrement courbe $R=20\,000\text{m}$)

Ces réflexions ont conduit à retenir des travées de 342 mètres et des travées latérales de 204 mètres.





2- Conception structurelle

La particularité structurelle de cet ouvrage est liée à la succession des travées haubanées. Le dimensionnement du tablier tant en résistance qu'en déformabilité est lié à la raideur des piles et pylônes.

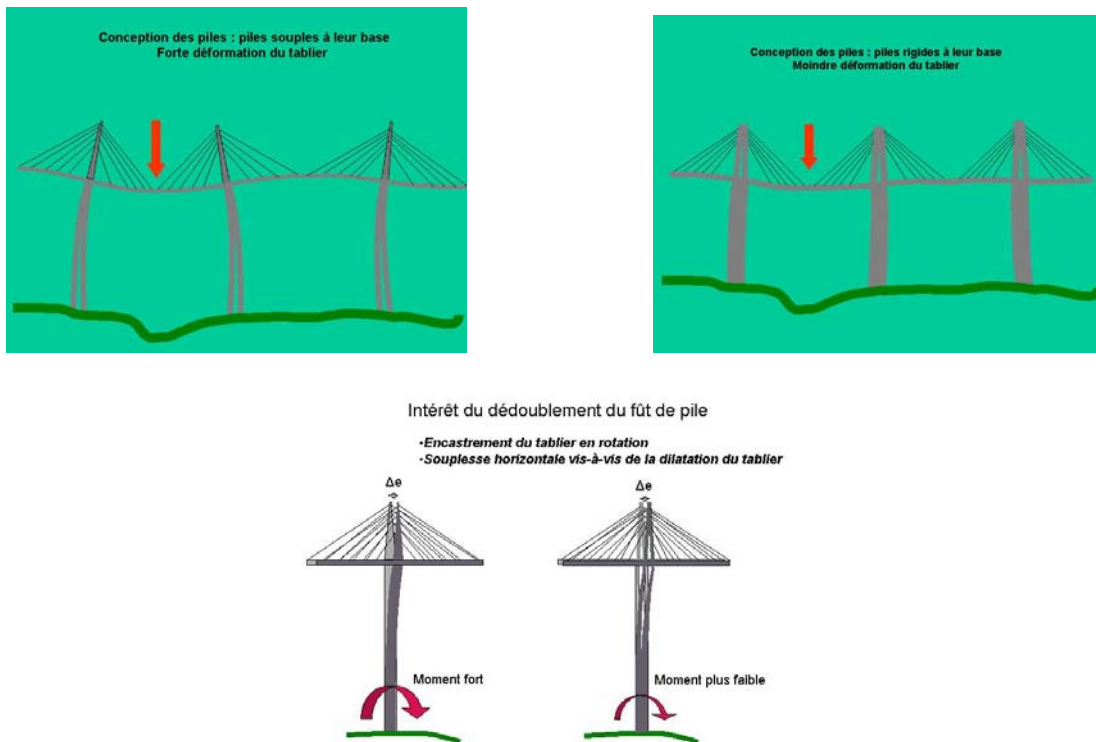
- ⇒ Avec des piles et pylônes souples il faut un tablier rigide donc épais
- ⇒ Avec des piles et pylônes rigides il est possible d'avoir un tablier d'inertie réduite et donc plus mince.

C'est cette dernière solution qui a été adoptée de façon à réduire les effets du vent sur le tablier.

Ce faisant l'encastrement du tablier sur des piles de grande raideur pose le problème de la reprise des variations linéaires qui génère des efforts incompatibles avec leur capacité de résistance.

La solution retenue de piles en Y permet de dédoubler les appuis et d'assurer un encastrement du tablier en rotation et une bonne souplesse en translation. Cette disposition a conduit logiquement à des pylônes en forme de V renversé.

L'architecte pour affiner l'ensemble pile – pylône a volontairement augmenté la hauteur du pylône par une sorte de chapeau au-dessus des nappes de haubanage purement décoratif.



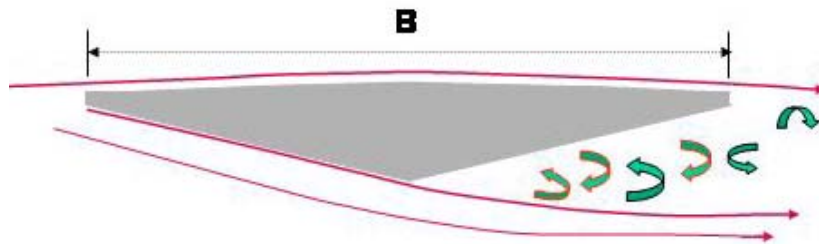


3- Conception de la coupe transversale

Les projeteurs ont été guidés par la recherche du meilleur profil vis-à-vis du comportement au vent. En effet compte tenu de la très grande hauteur des piles les efforts générés par les effets au vent sur le tablier, sont directement dimensionnants.

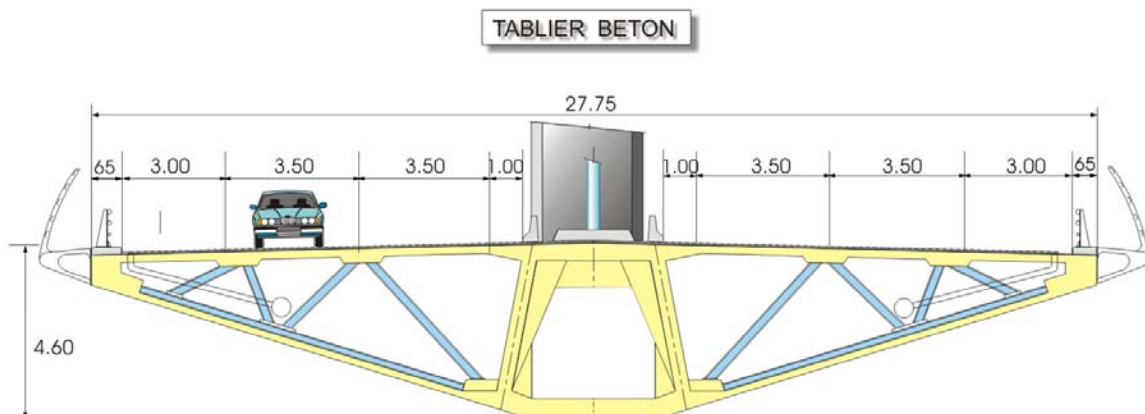
A partir d'une première proposition assez classique sur la base d'un profil trapézoïdal avec une base de 9 mètres, la recherche de formes plus nerveuses sur le plan architectural a conduit à mener les études d'avant projet sur la base d'un tablier à profil triangulaire particulièrement élégant.

Malheureusement les essais en soufflerie ont mis en évidence des risques d'instabilité aérodynamique liés à des phénomènes de décollements aléatoires de filets d'air au voisinage de l'angle saillant inférieur (échappements tourbillonnaires)



La conception s'est alors orientée vers un profil trapézoïdal à faces latérales très inclinées et à fond latéral étroit.

Dans l'optique de favoriser la mise en concurrence des entreprises de la construction en béton et de la construction métallique, deux tabliers ont été étudiés, l'un en béton précontraint, l'autre en acier.



Le tablier en béton a une hauteur de 4m60, le tablier en acier est plus fin, sa hauteur a été réduite à 4m20.

4- Le haubanage

Les travées sont soutenues par des haubans ancrés dans l'axe du tablier en suivant la courbure.

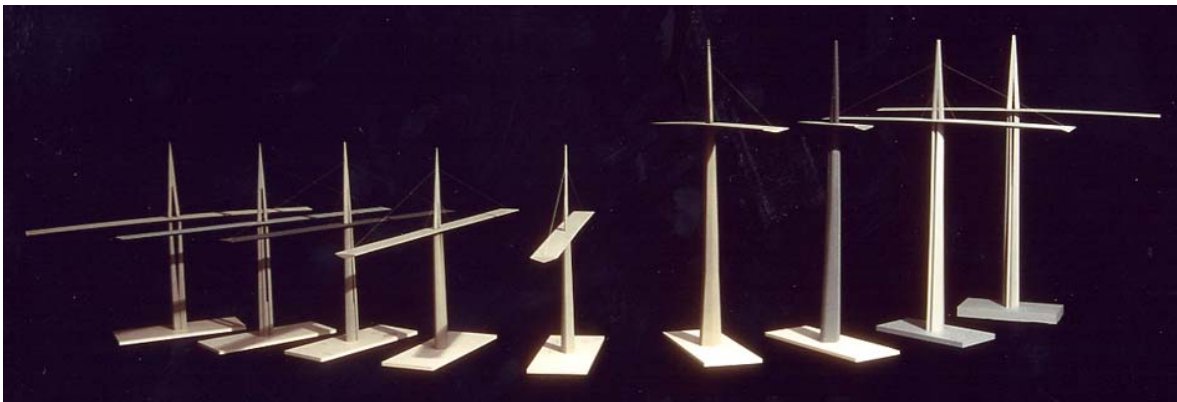
Pour la solution béton, leur nombre est de 25 par demi travée et ont une puissance variant de 50 T 15 à 93 T 15. Ils sont ancrés en tête de pylône selon une disposition en semi-éventail.

Pour la solution métallique, compte tenu de la légèreté du tablier, leur nombre a été réduit à 11.

5- Les piles

Leurs conceptions découlent directement du fonctionnement global de la structure.

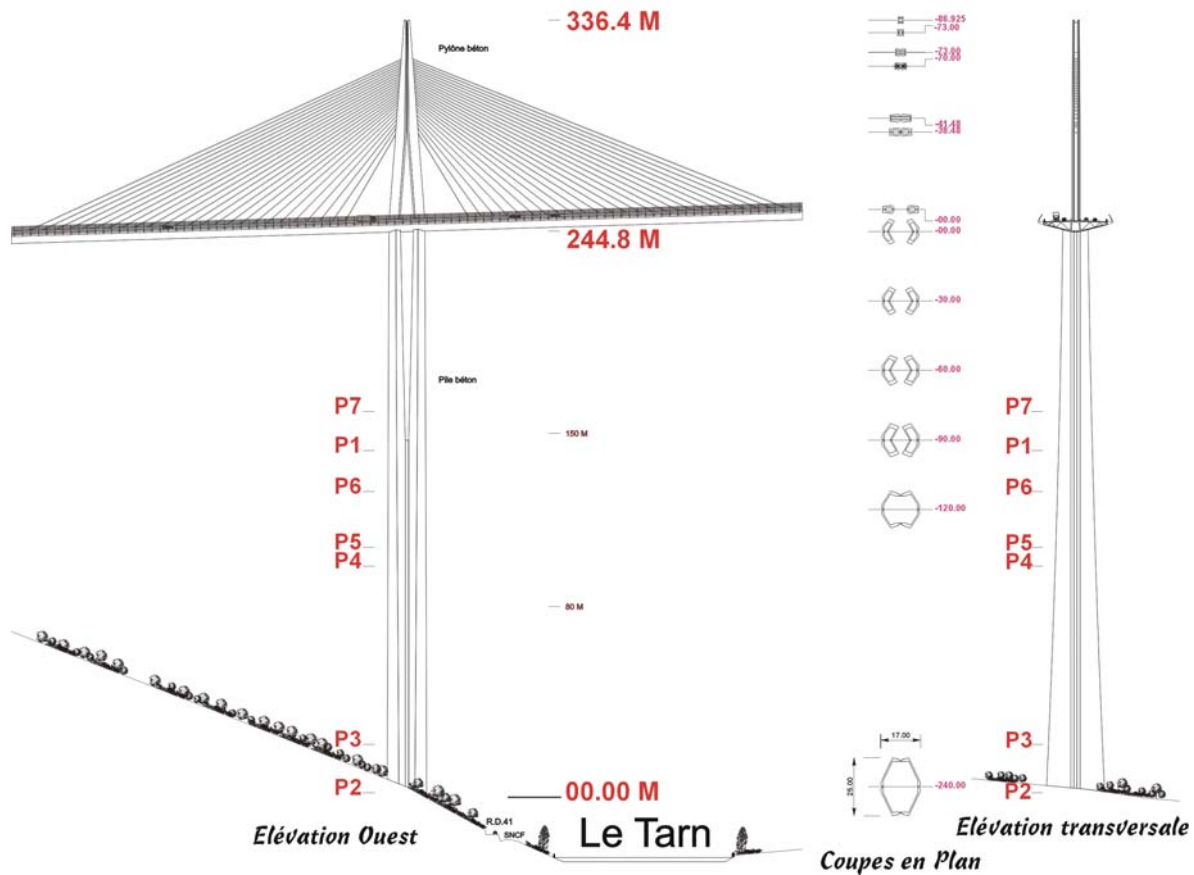
Elles ont fait l'objet d'une remarquable collaboration entre les ingénieurs et les architectes ce qui a permis de faire évoluer très fortement leur forme.



Les fûts de piles monolytiques à leur base se dédoublent en tête en deux colonnes distinctes à partir d'un niveau situé à 90 mètres sous le tablier.

Les fûts en caisson creux comportent des planchers espacés d'environ 30 mètres qui raidissent les voiles minces afin d'éviter un cloquage sous forte compression.

DETAIL PILE P2



6- Fondations

Toutes les fondations sont constituées de quatre puits de gros diamètres descendus sur les horizons rocheux. Les dimensions des puits varient selon les piles de 4m50 à 5m50 et leur longueur de 10 à 17 mètres.

7-Superstructures

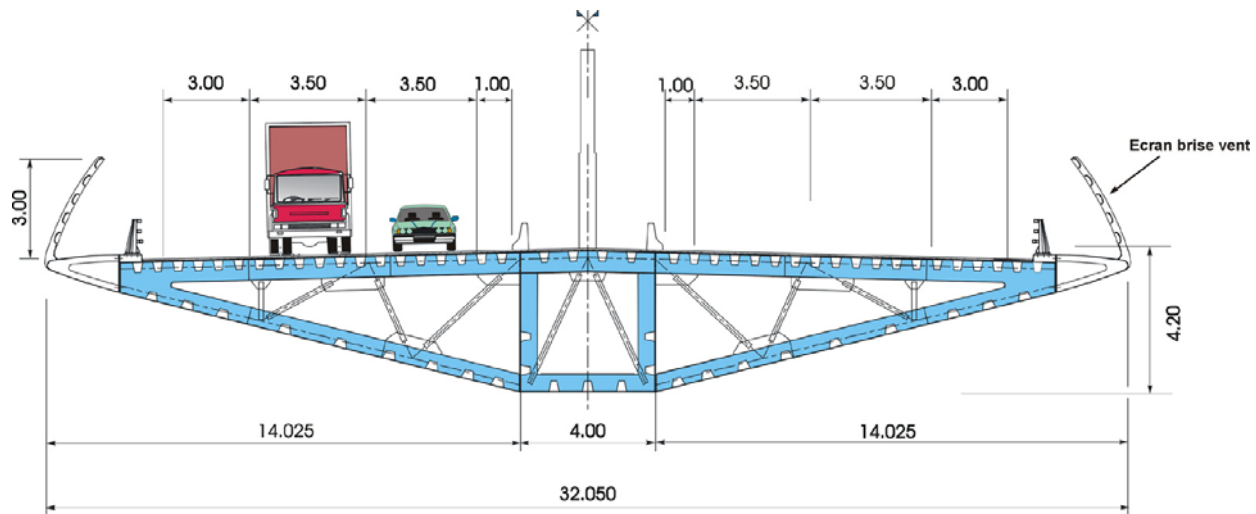
Les dispositifs de protections latérales sont classiques. Ils sont constitués par des barrières lourdes normalisées de type BN4 – 16.

La protection du terre plein central est assuré par des murets béton type GBA.

Les écrans brise vent fait l'objet de grandes et nombreuses réflexions et ont nécessité des recherches approfondies en soufflerie.

L'objectif était de :

- ⇒ Protéger efficacement l'utilisateur
- ⇒ Ne pas induire une trop grande détérioration des caractéristiques aérodynamiques
- ⇒ Permettre la vision du site aux automobilistes



Pour obtenir ces performances les écrans retour ont une porosité de 40% assurée par 5 lames cintrées de 35 centimètres de hauteur.

La forme incurvée vers l'intérieur donne également un aspect sécurisant pour l'utilisateur.

8- Les méthodes de construction au niveau du projet

La méthode de réalisation des piles est tout à fait classique, par levées successives, à l'aide de coffrages grimpants. La variation continue de géométrie est assurée par l'articulation de certains panneaux d'angles et par la suppression progressive des panneaux des faces pour réduire les surfaces.

8.1 – Tablier béton

Le mode de construction envisagé était celui de la construction en encorbellement à partir des piles à l'aide d'équipage mobile.

Compte tenu de la grande longueur du fléau et de la souplesse des piles, il était nécessaire pour assurer leur stabilisation de mettre en œuvre un haubanage inférieur reliant le tablier à des points d'ancrage au sol. L'utilisation d'amortisseurs dynamiques accordés étant rendu très difficile par l'importance de la masse en mouvement (15 000 tonnes).

8.2 – Tablier métallique

La solution qui avait été retenue au niveau du projet était relativement complexe faisant appel au lancement pour les travées de rive et les 100 premiers mètres des travées adjacentes.

Ensuite à partir des piles de rive construction à l'avancement avec un sur-encorbellement nécessitant des câbles provisoires supplémentaires jusqu'à l'accostage sur le voussoir sur pile suivant déjà construit.

Cette méthode de construction nécessitait en outre la mise en place d'amortisseurs dynamiques accordés, qui devaient être déplacés et de prévoir aussi des haubanages au sol.

9- Les études de vent

La connaissance du vent sur le lieu de construction a commencé dès l'origine du projet par une période d'observation sur site qui a duré plus d'un an. La comparaison de ces données avec les valeurs enregistrées par la station météorologique la plus proche (7km) a permis de transposer les statistiques climatiques. Compte tenu de la grande hauteur de l'ouvrage une méthode de sondage de l'atmosphère par ondes sonores (SODAR) a été adoptée. L'utilisation de ces deux techniques a permis de définir les caractéristiques du vent en quelques points de la vallée. Un modèle numérique et un modèle physique au 1/250 étudié en soufflerie ont corroboré et complété ces mesures.

Compte tenu de l'importance de la brèche, trois modèles de vent ont été définis en fonction de leur position. Ce sont ces modèles de vent qui ont permis de dimensionner l'ouvrage.

Les essais de stabilité ont été effectués en soufflerie en fonction de l'évolution des formes du projet. Ces essais ont été exécutés sur des maquettes afin de vérifier la qualité du profil géométrique vis-à-vis des problèmes de vibrations verticales ou de torsion. Ces essais ont été complétés par des calculs associant en chaque point du tablier la vitesse du vent aux propriétés aérodynamiques de l'élément de pont concerné mesuré en soufflerie.

10- Les autres études d'accompagnement du projet

Elles ont concernées :

- ⇒ Les études géologiques – géotechniques
- ⇒ Les études de fondation (puits d'essai)
- ⇒ Les études de béton hautes performances
- ⇒ La sismicité
- ⇒ L'entretien et l'exploitation de l'ouvrage
- ⇒ Le comportement de l'utilisateur
- ⇒ L'organisation générale du chantier
- ⇒ Les études de prix

CHAPITRE 4 : La mise en concession

Alors que le projet avait été mené jusque là dans le contexte d'une réalisation sous maîtrise d'ouvrage de l'Etat, Jean-Claude GAYSSOT alors ministre de l'équipement décidait en mai 1998 de concéder le viaduc de Millau sans toutefois remettre en cause l'ensemble des études techniques précédemment réalisées.

La concession du viaduc de Millau : un nouveau type de contrat

Un contrat de concession a pour objet de confier à une société le financement, la construction et l'exploitation d'un ouvrage public, et en contrepartie de lui octroyer le droit de percevoir un péage auprès des usagers qui l'utilisent.

Ouvrage exceptionnel sur le plan technique, le viaduc de Millau est également l'occasion d'innovations en matière de concession.

A la suite de la décision du ministre de l'Equipeement de concéder la réalisation et l'exploitation du viaduc, un appel d'offres international est lancé en 1999. La Compagnie Eiffage du viaduc de Millau est retenue. Les études de détail de l'ouvrage menées par les services de l'équipement à un stade très avancé du projet, et mises à la disposition des 4 candidats admis à présenter une offre, ont permis de réduire les incertitudes techniques. Cette façon de procéder a présenté de nombreux avantages. Elle a notamment facilité le choix du concessionnaire et les mises au point du contrat de concession. Elle a probablement diminué son coût pour la collectivité et accéléré la réalisation de l'ouvrage en minimisant les études et les travaux préparatoires restant à la charge du concessionnaire.

La particularité de cette concession est d'avoir imposé le parti architectural et la géométrie de l'ouvrage en laissant au concessionnaire le choix du mode de construction ainsi que les modalités d'exploitation sur la base d'un cahier des charges très précis.

L'apport technique des entreprises du concessionnaire

Le groupe Eiffage a su tirer pleinement parti de cette situation grâce à son savoir-faire et au recours à une préfabrication très poussée.

«Grâce à la solution métallique, 96% des heures de travail ont pu être réalisées au sol» explique Jean - François Rovérato, président du groupe Eiffage.

L'apport du groupe réside aussi dans la méthode de lancement du tablier. Eiffel Constructions Métalliques a en effet inventé à cette occasion des translateurs permettant de faire avancer le tablier sur les piles et les palées provisoires au fur et à mesure de l'assemblage de la structure, malgré son poids et sa courbure.

Lors de la réalisation de l'ouvrage, son architecture dessinée par Lord Foster a été scrupuleusement respectée tant en ce qui concerne le dessin des piles que l'esthétique du tablier et des pylônes.



© Photo Jean-Claude GAYRAUD | AIOA-DDE12



Le chantier s'est déroulé dans le délai record de 39 mois imposé par la concession. Aucun accident grave du personnel n'a été déploré malgré la cadence soutenue par tous les hommes qui ont participé à la construction de l'ouvrage.

Le Viaduc de Millau et la sécurité de l'ouvrage

La garantie d'une parfaite sécurité de l'ouvrage repose sur le fait que deux structures de contrôle indépendantes sont mises en place, l'une par l'Etat, il s'agit de l'autorité chargée du contrôle (ACDC), et l'autre par la société concessionnaire, avec ses maîtres d'œuvre, la Setec et la SNCF.

Deux facteurs de risque ont été en outre particulièrement analysés pour garantir la durabilité de l'ouvrage :

- Les fondations. Elles ont été conçues en s'appuyant sur des études géologiques poussées afin de s'assurer de la stabilité des terrains et de leur capacité à supporter l'ouvrage.
- Les sollicitations du vent. La méthode même de construction de l'ouvrage le rend plus sensible à ces sollicitations pendant les phases de lancement qu'il ne le sera désormais dans sa position définitive. Il a donc été dimensionné pour résister à un vent nominal de 250 km/h alors que le vent maximal observé à Millau n'a jamais dépassé 180 km/h.

QUELQUES CHIFFRES

Chronologie de la construction du viaduc

- 10 octobre 2001 : début des travaux
- 14 décembre 2001 : pose de la 1^{ère} pierre du chantier
- janvier 2002 : fondations des piles (appui intermédiaire du tablier du viaduc)
- septembre 2002 : début de l'assemblage du tablier
- 25/26 février 2003 : premier lancement du tablier
- printemps 2004 : clavage (jonction des 2 parties du tablier par poussage) - début des équipements
- 2^{ème} semestre 2004 : mise en place des pylônes et des haubans (câbles métalliques inclinés et rectilignes participant à la stabilité du viaduc), démontages des palées provisoires
- 14 décembre 2004 : inauguration et mise en service du viaduc.

Le viaduc de Millau en chiffres : les données techniques

- longueur : 2460 mètres
- largeur du tablier métallique : 27,70 mètres
- épaisseur : 4,20 mètres
- nombre de piles : 7
- nombre de travées haubanées : 8
- longueur des travées : 6 travées de 342 m et 2 travées de 204 m
- hauteur de la plus haute pile : 245 m
- nombre de paires de haubans : 77
- volume total de béton : 85000 m³
- poids de la charpente métallique comprenant le tablier et les pylônes : 36.000 tonnes
- nombre de voies : 2x2 de chacune de 3,5 m
- largeur de la bande d'arrêt d'urgence : 3 mètres

Les points clés du contrat de concession

- Un investissement d'environ 320 M€ de la part du concessionnaire
- Un financement entièrement privé, sans participation de l'Etat et des collectivités territoriales
- Une durée de concession de 78 ans révisable
- Des tarifs saisonniers (valeur nov. 2000) : 6,10 € l'été et 4,57 € les autres mois Tarif de passage pour les poids lourds : 19,06€



Bibliographie :

- ⇒ L'A75 et le contournement de Millau – J-F COSTE
- ⇒ Le viaduc de Millau – L'évolution du Projet : B. GAUSSET - ARCADIS