

# **VIADUC de MILLAU**

## **LA MISE AU POINT DU PROJET DÉFINITIF, LES ETUDES D'ENSEMBLE, LES ETUDES SPECIALES**

J.M. CREMER, V. de VILLE de GOYET, J.Y DELFORNO

### **1. INTRODUCTION**

Le Grand viaduc de Millau a été imaginé et conçu dans le courant des années 1990 par Michel Virlogeux et un groupement de bureaux d'études français en collaboration avec l'architecte anglais Sir Norman Foster. A l'origine, il s'agissait d'un ouvrage multi-haubané dont les piles, le tablier et les pylônes étaient entièrement réalisés en béton. Une variante à tablier métallique avait bien fait l'objet d'une étude parallèle mais nul ne la croyait concurrentielle.

Dès 1999 dans le cadre du viaduc de Millau, l'OTUA, a pris l'initiative de consulter le bureau Greisch pour étudier de manière plus approfondie la faisabilité d'un tablier en acier et de développer une méthode de construction qui rendrait cette solution concurrentielle. Un comité d'accompagnement auquel prenaient part les 4 plus grands constructeurs métalliques français était "chargé" de vérifier l'adéquation des études réalisées aux moyens à mettre en œuvre. Face à l'audace de la proposition, seule une des entreprises, Eiffel Construction Métallique était prête à relever le défi et prit l'engagement de s'associer au bureau Greisch pour préparer l'offre le moment venu.

L'appel d'offre pour la construction et la concession du Viaduc fut lancé au printemps 2000. Six mois durant, une équipe d'ingénieurs s'est attelée à mettre au point l'ouvrage et sa méthode de construction par lancement.

Début 2001, le Ministre de l'Équipement Jean-Claude Gayssot, marquait officiellement sa préférence pour la solution à tablier métallique, proposée par le groupe Eiffage et sa filiale Eiffel.

Ensuite, dès le premier semestre 2001, les études d'exécution du viaduc démarraient. Tandis que STOA Eiffage TP, EEG-Simecsol, Thales et Serf avaient en charge:

- La gestion du chantier
- le dimensionnement des piles, culées et fondations,
- les plans de toutes les structures en béton

le bureau d'études Greisch avait pour mission de réaliser:

- les études complètes du viaduc en exploitation,
- les calculs de toutes les phases de construction : lancement du tablier, transport et montage des pylônes métalliques sur le tablier, mise en place des haubans,
- le développement et la mise au point de tous les organes servant au montage et en particulier au lancement du tablier (appuis provisoires, dispositifs d'avancement, ...)
- l'établissement de tous les plans relatifs aux éléments métalliques de l'ouvrage terminé mais aussi des éléments nécessaires à la construction,
- une assistance permanente sur chantier pendant les opérations délicates de lancement, en dépêchant jusqu'à cinq ingénieurs sur place pour contrôler en permanence et en temps réel le comportement du viaduc pendant son évolution au-dessus du vide.

Ce texte a pour but de développer essentiellement trois aspects:

1. La mise au point du projet définitif. Le POA avait permis de définir la structure en phase d'exploitation du viaduc de Millau. Les études d'exécution ont permis de proposer une

méthode de construction propre à la solution métallique, à vérifier le comportement de la structure en phase de construction et à assurer de sa durabilité en service. Cette démarche a conduit

- à des aménagements de la structure tout en respectant les critères architecturaux imposés par le concessionnaire,
  - à la conception de l'ensemble des appareils de montage.
- 2 Les principales études d'ensemble couvrant à la fois le comportement en service que les phases de construction et l'assistance au chantier.
  - 3 Les études spéciales qui ont dû être mises en œuvre pour mener à bien le dimensionnement de la structure en abordant les instabilités des tôles comprimées raidies, quelques ordres de grandeurs induits par les effets du vent.

## **2. - LA MISE AU POINT DU PROJET DÉFINITIF**

### **2.1. Le lancement**

#### 2.1.1. Faisabilité

La conception d'un ouvrage d'art implique d'emblée une réflexion sur la méthode d'exécution.

Si l'on veut prendre en compte l'option de lancement, la première interrogation doit porter sur l'élançement du tablier. Les valeurs généralement citées pour les ponts métalliques sont de l'ordre de 20 à 30.

Le tableau 2.1. permet de mieux cerner la faisabilité de cette option.

<b>Ouvrage</b>	<b>Date</b>	<b>Portée caractéristique</b>	<b>Elancement (L/H)</b>
Viaduc de Vevey (Suisse)	1970	129 m	26
Viaduc de Vaux (Suisse)	1995	141 m	
Viaduc de Verrières (France)	2001	144 m	32
Pont Charles de Gaulle (France)	1998		37

Pour le viaduc de Millau, la réflexion a porté immédiatement sur deux points:

- La hauteur de la section.

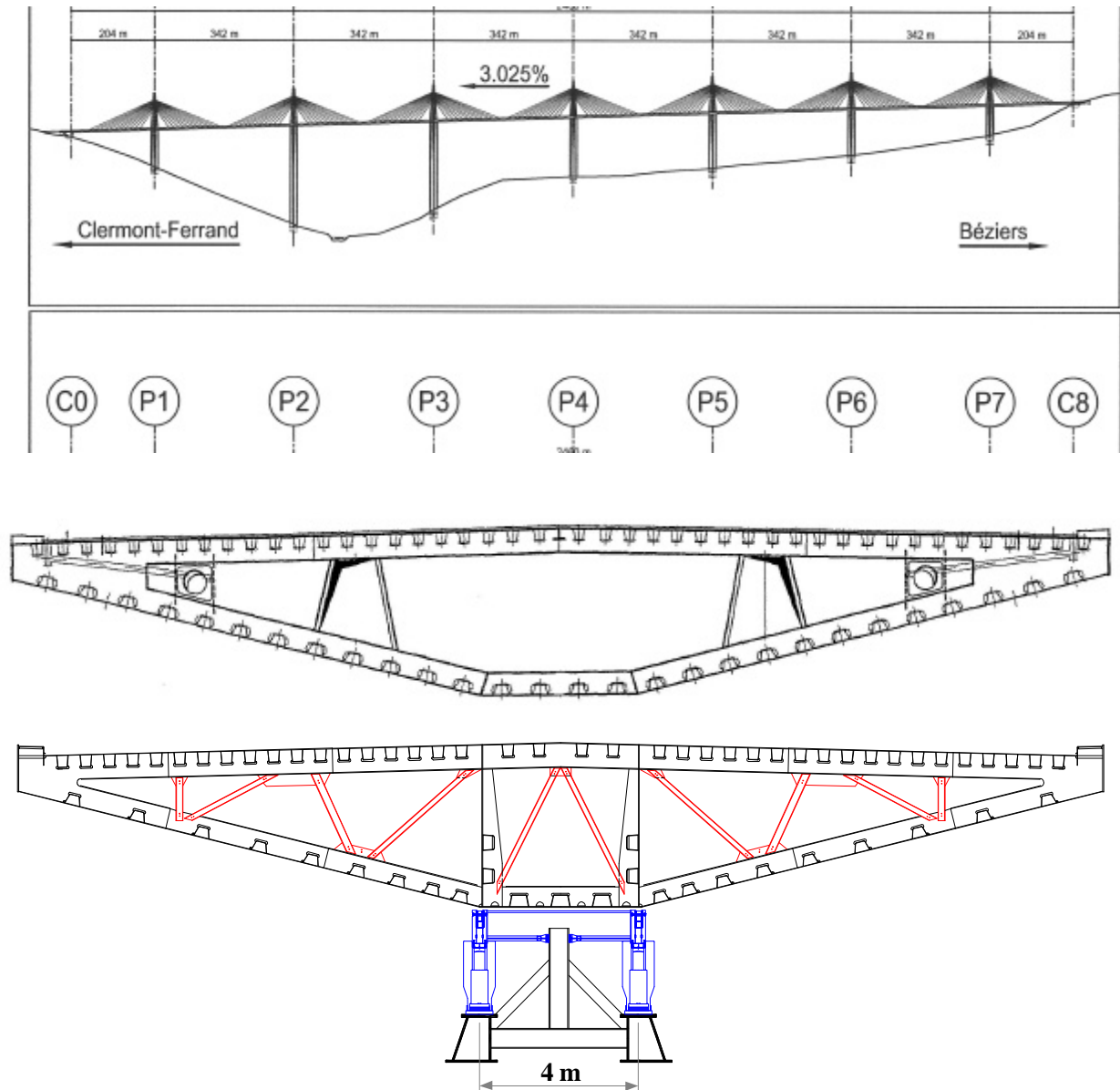
342 m de portée entre piles, pour une hauteur de poutre de 4,20 m donne un élançement supérieur à 80. Un lancement est impossible sans des appuis intermédiaires; des palées provisoires s'imposaient.

- La section transversale.

Le lancement demande des âmes verticales (ou presque). Elles étaient inexistantes dans le projet initial; il fallait donc en ajouter

D'autre part, dans les travées courantes, c'est-à-dire en dehors de la zone influencée par le porte-à-faux, c'est le moment négatif, bien supérieur au positif, qui est dimensionnant.

Les calculs d'approche montraient que la section minimale était largement déficitaire en capacité de résistance en moments négatifs.



### 2.1.2. Avantages et désavantages du lançage

Les avantages découlent de l'assemblage sur une plate-forme où 90 à 95 % de la main d'œuvre sur site peut se faire dans des conditions de travail favorables:

- Il est possible d'y installer un véritable atelier fixe,
- La sécurité et la protection des hommes vis-à-vis des intempéries permettent une qualité améliorée et de meilleurs rendements.
- La mise à disposition d'une aire de travail étendue et de moyens de manutention adaptés permettent une exécution plus rapide et donc des gains en délai.

Les désavantages de la technique doivent aussi être pris en considération:

- La structure doit être adaptée et renforcée; en particulier, il est indispensable d'avoir des âmes verticales.
- Un matériel spécifique important doit être mis en oeuvre pour réussir l'opération : palées, appuis de glissement, matériel moteur, avant- bec,

- L'aménagement d'une plate-forme de grande surface est nécessaire
- Pour ce qui concerne le planning, certaines opérations doivent être décalées et attendre la fin du lançage

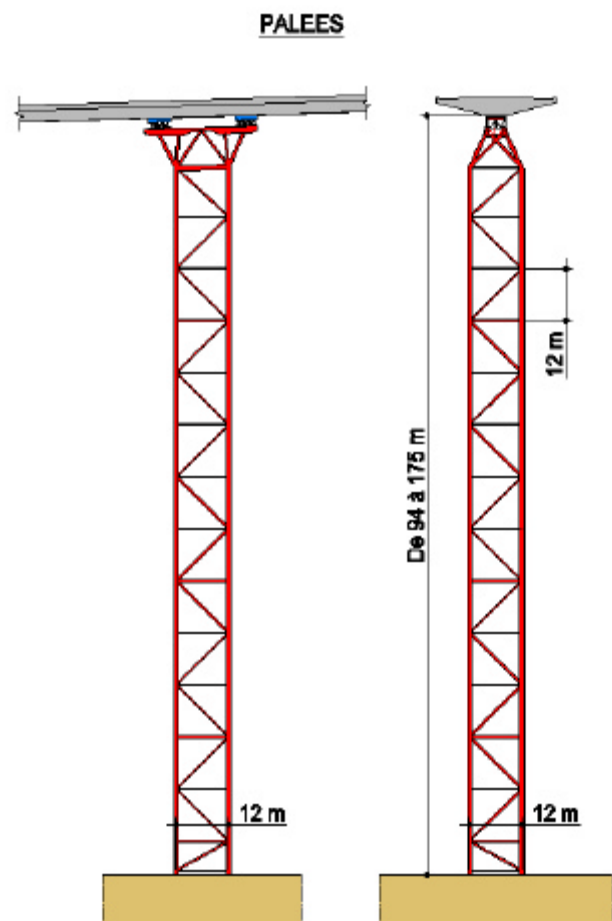


### 2.1.3. Spécificité de Millau

#### *Les palées provisoires*

La nécessité des palées au milieu de chaque grande travée était évidente.

Elles permettent de limiter à 171 mètres maximum la portée à franchir lors du lançage. .  
Seule la travée P2-P3, au-dessus du Tarn, en est dépourvue.



Pour les cinq plus grandes, la hauteur varie de 94 à 174 m et la charge maximale appliquée en tête est supérieure à 70.000 KN.

Ces structures sont impressionnantes par elles-mêmes, mais leur élancement reste tout à fait raisonnable. L'originalité et la performance réside essentiellement dans la méthode de construction.

Les cinq plus grandes palées sont des structures carrées de 12 mètres de côté en treillis tubulaires.

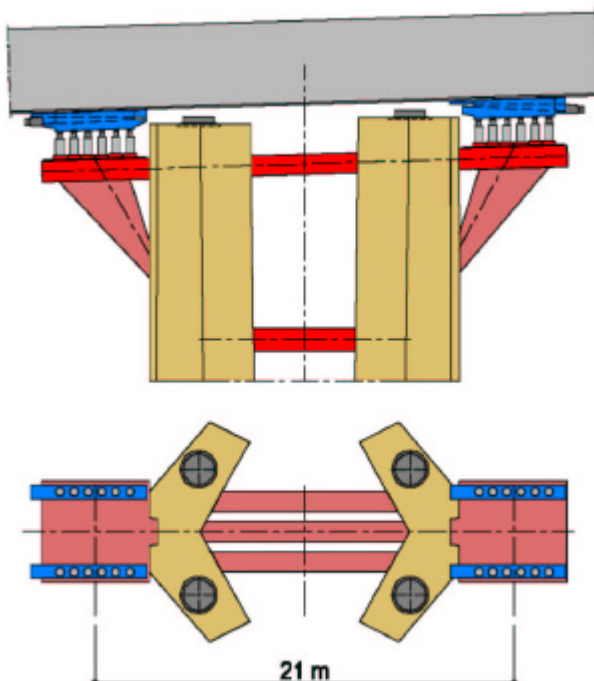
Ces palées sont montées par télescopage à partir du bas, méthode utilisée à plus petite échelle dans le montage des grues tour. Chaque jour, une maille de 12 mètres était assemblée à la maille supérieure et l'ensemble est hissé jusqu'à dégager l'espace suffisant au montage de la maille suivante. Après montage du chevêtre supérieur qui supporte le matériel de lancement, le hissage d'une palée de 150 mètres s'effectue en moins de 15 jours.

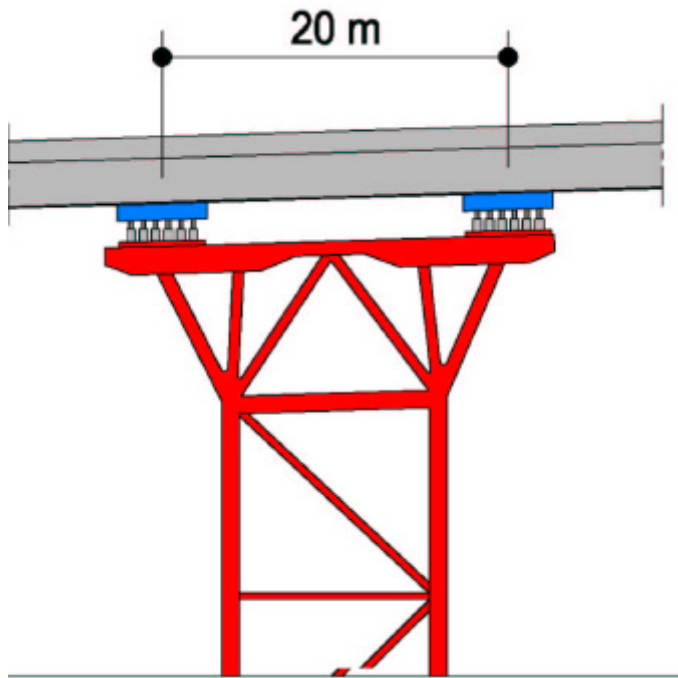
#### *Le dédoublement des appuis en tête de piles et palées*

Avec une portée entre pile (palée) et palée (pile) de 171 m, l'élancement du tablier de 42 ( $171/4,20$ ) restait supérieur à 40 et était difficilement envisageable sans des renforcements importants de la section.

Il a dès lors été proposé de dédoubler les appuis longitudinaux au droit de chaque pile et palée et de fixer leur entredistance à 20 m. Cette solution rencontrait plusieurs "soucis":

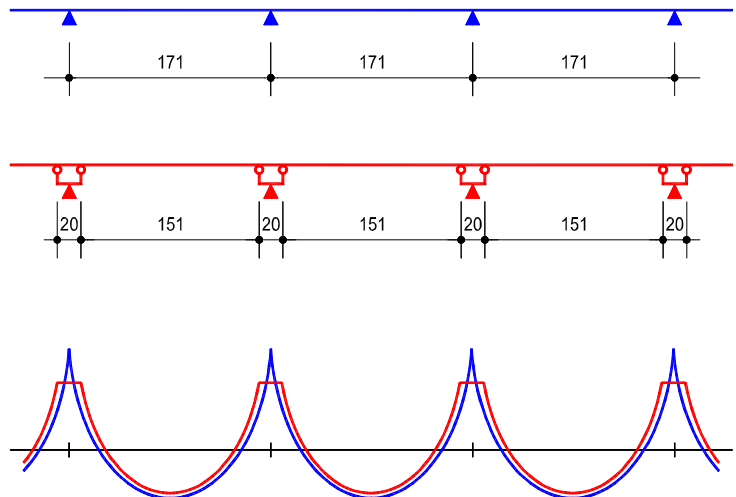
- Une réduction de l'élancement à 34 :  $(171 - 20)/4,20$
- La nécessité d'appliquer sur le caisson les réactions d'appui sur une grande longueur d'âme à cause de son poids
- La nécessité d'installer les dispositifs de lancement en dehors du gabarit trop exigü des piles





L'examen comparatif des diagrammes des Moments de flexion permet de mettre en lumière que cet "artifice" est déterminant pour la faisabilité du lançage.

Le dédoublement des appuis réduit la portée effective à 151 m, mais son effet est majoré. En effet, ce dédoublement ne diminue pratiquement pas le moment de flexion positif (à peine 4 %), par contre, le moment négatif est diminué de plus de 30 % et correspond à la valeur du moment d'encastrement d'une poutre de 141 m de portée. L'élancement du tablier est alors réduit à 34, valeur tout à fait acceptable pour un lançage.



### *Le clavage au dessus du Tarn*

Dans la travée P2-P3, le viaduc franchit le Tarn en le surplombant de 270 m. Une palée au niveau de cette travée présentait des inconvénients majeurs:

- Il aurait été nécessaire de prévoir des haubans de stabilisation ou une structure évasée à l'image des pylônes métalliques de télécommunication avec des problèmes d'encombrement pour les fondations
- Elle n'aurait pu être construite avec la cage de télescopage et aurait donc induit des difficultés de mise en œuvre.

- Le lancement à partir d'une seule aire de lancement aurait allongé le délai de manière inacceptable

Le choix final s'est donc porté sur un lancement mené à partir des deux culées avec la nécessité d'une opération de clavage au milieu de la travée située au milieu de la travée située la plus haute en altitude..



#### *La mise en place avec pylône et haubans de lancement*

Il est évident que le franchissement de 171 m ne peut s'envisager sans un avant-bec léger mais conséquent. Pour Millau, le schéma statique de l'ouvrage imposait naturellement l'utilisation d'un pylône et des haubans définitifs.

Si le haubange peut être réglé pour accoster l'appui suivant par le dessus, par contre, il est évident que le pylône d'un poids de 650 tonnes est défavorable lorsqu'il se trouve au milieu d'une travée. La variation des sollicitations dans le tablier est également complexe dans la portion renforcée par le pylône et les haubans.



### Les boggies

Le long des 342 premiers mètres du tablier, le tablier subit, au droit d'un appui, des rotations de grande amplitude: de + 2% à - 2%.

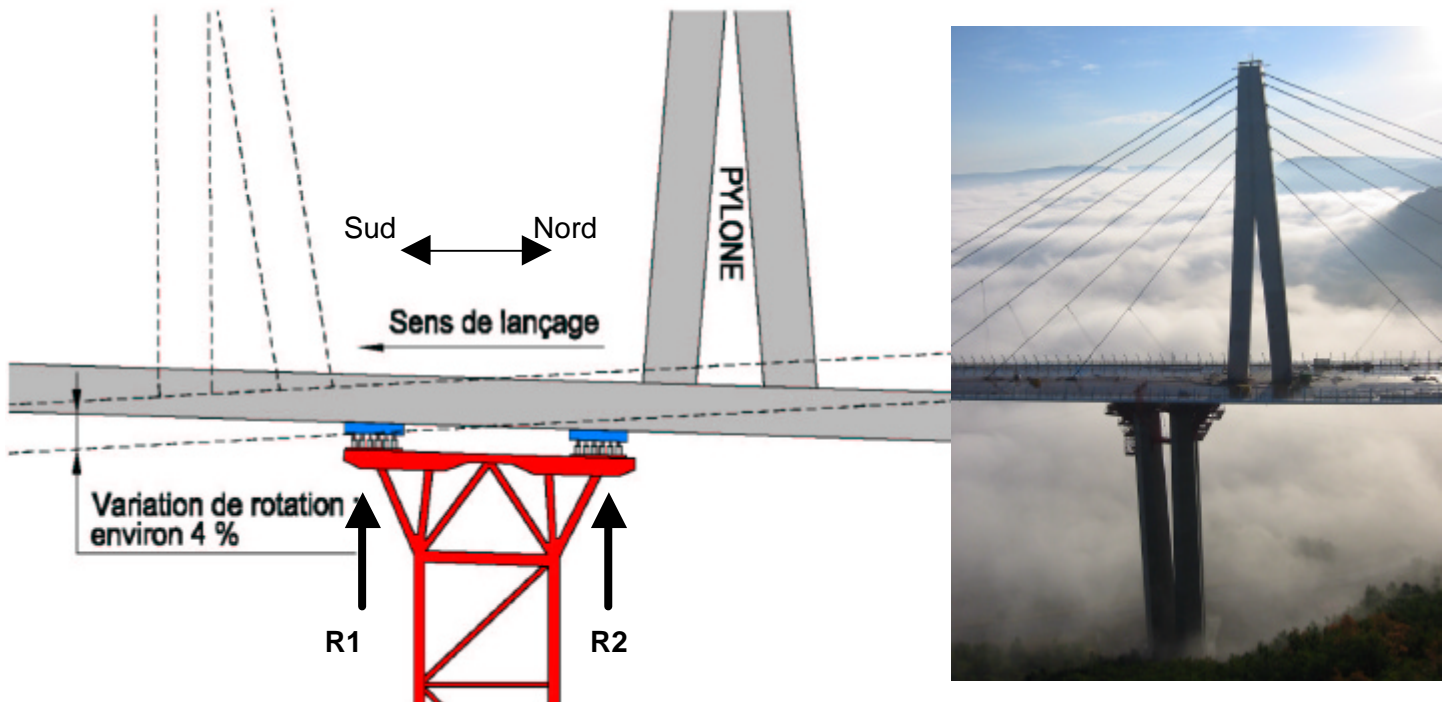
De façon imagée, le pylône "monte" sur l'appui lors de l'approche de l'appui et "descend" lorsqu'il s'en éloigne.

Pour éviter que les 2 points d'appuis d'une même pile ou palée soit au cours du passage du pylône soumis à des charges soit excessives d'un coté soit totalement déchargés de l'autre ( $R1 \gg$  et  $R2 \ll$ ), un système de boggie reliant 2 appuis longitudinaux est mis en place afin d'égaliser ces 2 réactions ( $R1 = R2$ ).

Ce boggie, réalisé grâce à l'hydraulique comporte des vérins verticaux avec une course de 500 mm pour permettre de reprendre ces variations de rotation et assurer le parfait centrage de la réaction d'appui. Ce système a été appelé "Balancelle".

Le transfert d'huile d'un groupe de vérins coté Sud aux vérins coté Nord n'est possible que pour des mouvements lents, ce qui était le cas pendant l'avancement.

Par contre, les variations de rotation provoquées par des mises en vibration du tablier sous les vents violents n'étaient pas intégrées par le boggie hydraulique. Dans ce cas de sollicitation, le tablier était supposé encastré sur les piles et palées.



### Le profil en long du chemin de lançage

Le lançage ou le poussage d'un pont se fait habituellement au niveau final de l'ouvrage pour éviter une opération lourde de mise à niveau de la structure sur tous les appuis. Ceci implique que

- les plates-formes d'assemblage soient installées derrière les culées, au niveau des appareils d'appui
- les culées et le niveau définitif de la chaussée à l'arrière des murs garde-grève soient réalisés après la fin du lançage.

Pour éviter

- Les délais très importants qu'aurait demandé l'abaissement de la plate-forme sur une hauteur de 5,0 m et sur toute la longueur du chantier,



- Les appareillages importants en tête de piles et palées pour effectuer un abaissement titanique après le lançage,

Et pour permettre la réalisation complète des culées avant le lançage alors que les premiers éléments du tablier métallique étaient fabriqués en usine,

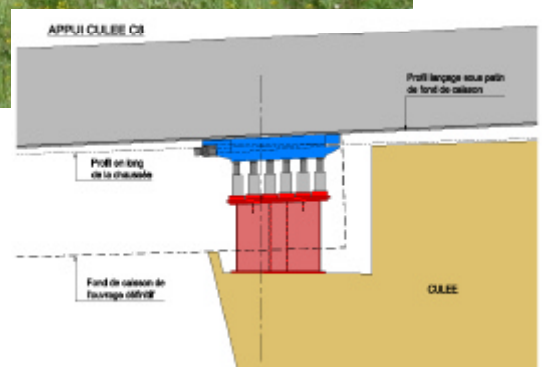
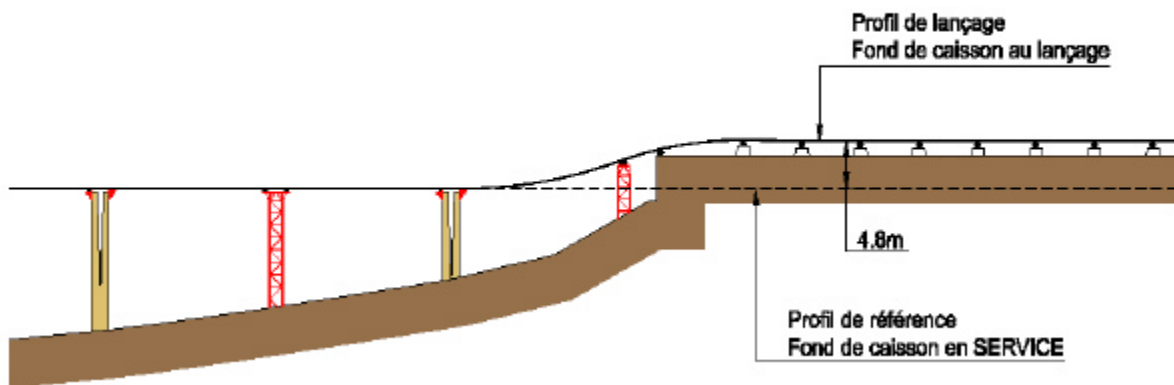
il a été décidé d'installer la plate-forme d'assemblage au niveau de la chaussée, de passer au-dessus des culées entièrement réalisées, et de "plonger" pour atteindre le niveau final sur la première pile située à 204 m de la culée.

Cette technique sollicite la structure et la déforme de manière spectaculaire. Pour éviter une incidence trop néfaste sur le dimensionnement, le franchissement par le pylône de lançage de ces 204 m a nécessité :

- De nombreux réglages des niveaux d'appuis et d'une correction du réglage des haubans
- le relèvement de l'extrémité du porte-à-faux de 2,50 m, lors de l'accostage des palées  $\pi 2$  et  $\pi 6$ .

En fin de lançage, l'arrière du tablier doit être abaissé d'environ 5,0 m pour être déposé sur ses appuis définitifs.

### PROFIL DE LANCAGE



### *L'avant-bec*

Les opérations de lancement ne pouvaient évidemment être entreprises qu'accompagnés de vents modérés. Le dimensionnement de l'ouvrage en cours de lancement tenait compte de vents, à une vitesse de pointe de 85 km/heure.

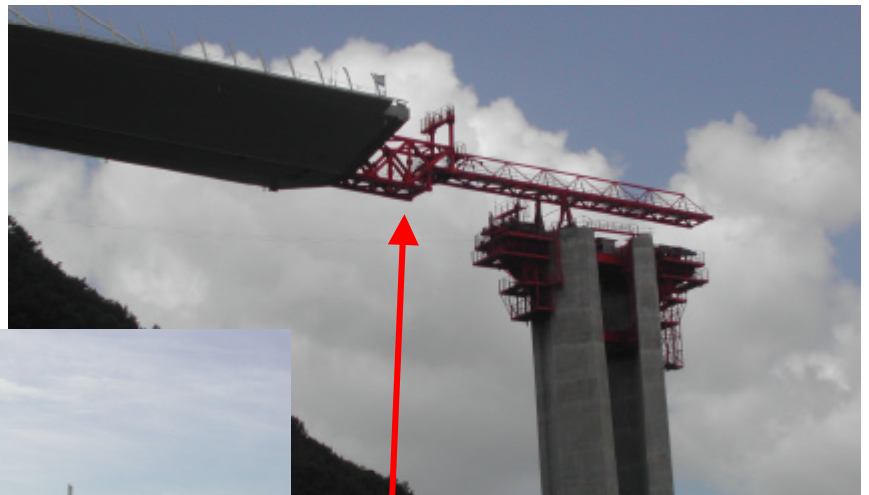
Si un incident grave était survenu à une étape quelconque de l'avancement ou si un risque de vent très violent était apparu, la structure devait pouvoir être mise en sécurité. Le configuration était appelée situation accidentelle.

Sur les 342 m que représentent le passage d'une pile à l'autre, les 50 derniers mètres avant l'accostage par le caisson sur la pile suivante étaient particulièrement délicats. La palée intermédiaire, dont le pylône s'approchait, représentait un appui souple et peu efficace pour limiter les déformées transversales du tablier en porte-à-faux.

Pour ces 50 derniers mètres, en cas d'arrêt accidentel avec vent violent, l'extrémité de l'avant-bec devait être appuyé transversalement sur les dispositifs de blocage installés sur les piles.

Cet avant-bec permettait également :

- l'accès sur l'appui d'accostage par le personnel en charge du démarrage de l'installation hydraulique
- l'appui vertical de l'extrémité du tablier dans les 20 derniers mètres en cas d'arrêt accidentel.



Appui vertical possible dans les 20 derniers m



Dispositif pour un blocage transversal sur la pile dans les 50 derniers m.

### *Les translateurs*

Pour le lancement d'un tablier, l'ensemble du matériel qui va permettre le déplacement de l'ouvrage est particulièrement important

- Les rouleaux, les chaises à galets, les patins et les appuis de glissement
- le système moteur: des câbles de tirage ou des vérins de poussage
- le dispositif de guidage transversal.

L'effort moteur doit essentiellement vaincre deux composantes :

- Le frottement des galets ou des appuis de glissement
- La composante du poids, conséquence de la pente: en poussée ou en retenue.

Cet effort moteur est habituellement appliqué aux culées. Les appuis définitifs (les piles) et les appuis provisoires (les palées) doivent reprendre en tête les efforts de frottement; ces efforts induisent alors des sollicitations d'autant plus défavorables que la hauteur de ces appuis est importante.

Pour éviter de telles sollicitations, il a été conçu et installé, en tête de chaque support, un dispositif pour contrebalancer localement le frottement et l'effort dû à la pente. Ce dispositif a été appelé translateur.

Il comprenait :

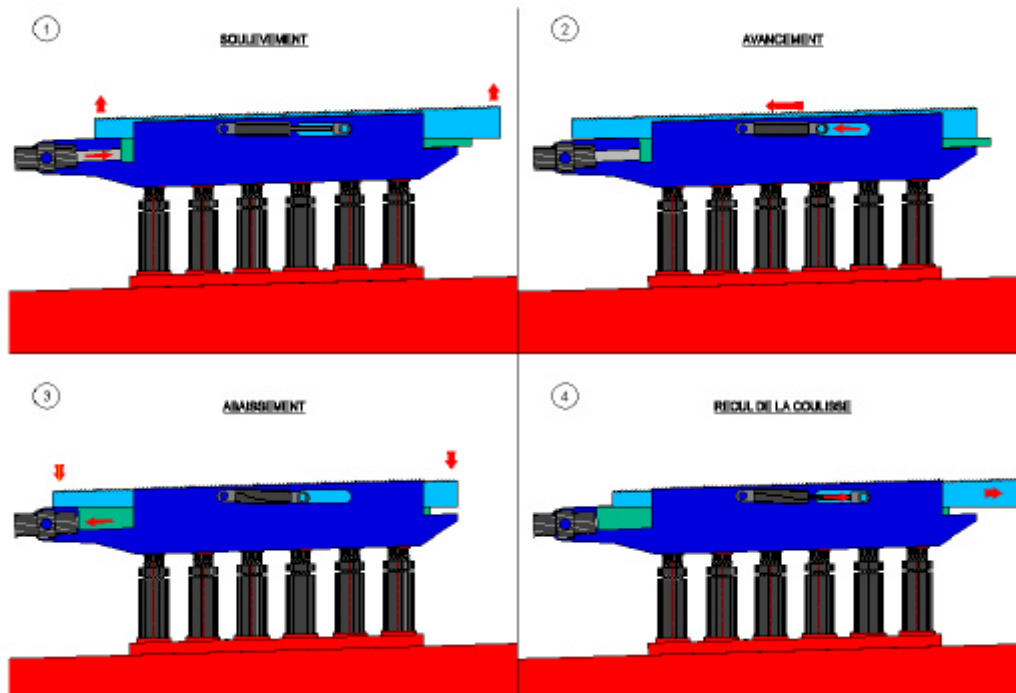
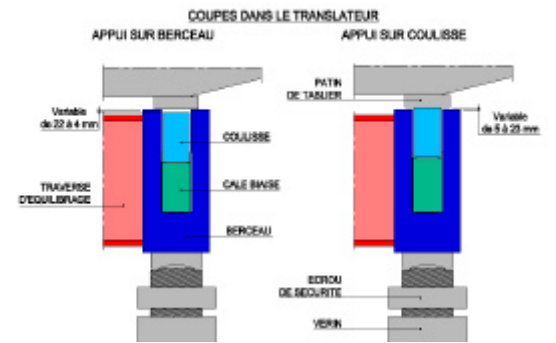
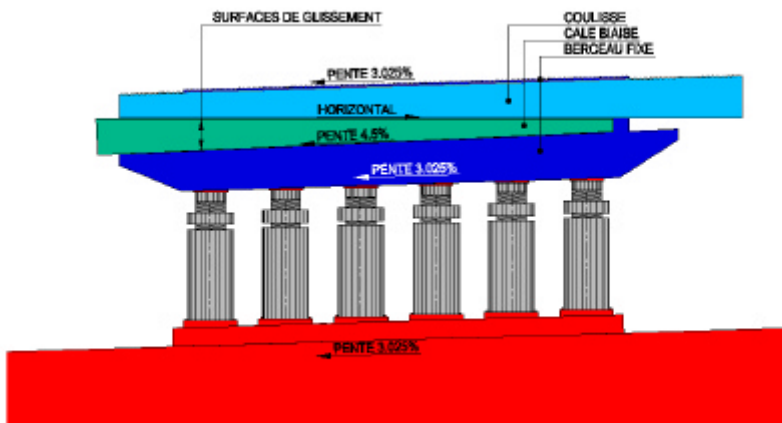
- Le berceau sur lequel s'appuie le pont à l'arrêt ou au repos
- Une coulisse sur laquelle s'appuie le pont lors du mouvement. Cette coulisse est actionnée par 2 vérins de 600 KN avec une course de 600 mm.
- Une cale biaise, insérée entre la coulisse et le fond du berceau. Cette cale biaise, poussée par un vérin de 2500 KN, permettait de remonter le niveau de la coulisse, soulever le pont et le décoller du berceau.
- Un dispositif de guidage latéral qui assurait le centrage des patins de glissement sur le translateur.

Pendant les 500 premiers mètres, La réaction variait beaucoup et pouvait atteindre 17.000 KN par translateur. Alors que la totalité du pont a une pente de 3 %, l'avancement des 600 mm de la coulisse sur la cale biaise se faisait sur une surface horizontale pour des raisons de sécurité, la variation de hauteur due à la pente étant compensée par la cale biaise.

Le cycle classique de fonctionnement était le suivant :

1. Repos du pont sur le berceau
2. Introduction de la cale biaise → soulèvement du pont
3. Introduction de la coulisse → avancement du pont de 600 mm
4. Retrait de la cale biaise → abaissement du pont sur le berceau
5. Retrait de la coulisse sur 600 mm

Chaque cycle durait de 3,5 à 5,0 minutes. Tous les translateurs étaient pilotés par une unité centrale qui assure la commande et le contrôle de toutes les opérations. L'avancement moyen était de 7,0 à 10,0 mètres par heure; pendant le mouvement en lui-même, il était de 25 à 30 m/heure, soit de 7 à 8 mm à la seconde.



### Les phases de lançage

En préalable à toute phase de lancement, les opérations étaient les suivantes:

- Analyse des conditions météo pour vérifier que l'on disposait d'une fenêtre météo qui garantissait que durant 3 jours, durée d'une phase courante, le vent maximum à la hauteur du tablier serait inférieur à 85 km/h
- Levée du point d'arrêt après vérification que toutes les procédures avaient été bien respectées
- Suppression des dispositifs de mise en sécurité pendant la période d'assemblage du tablier sur la plate-forme: point fixe, clouages sur piles et/ou palées
- Essais à vide du dispositif de pilotage des vérins
- Libération des écrous de sécurité des vérins sur l'ensemble des balancelles.

Les phases de lançage sont similaires au Sud et au Nord:

- Au Nord, la longueur du tablier était de 717 m et au Sud, de 1743 m
- Le nombre de phase était de 6 au Nord et 12 au Sud
- Au Nord, la pente avait un effet de frein, au Sud, un effet moteur

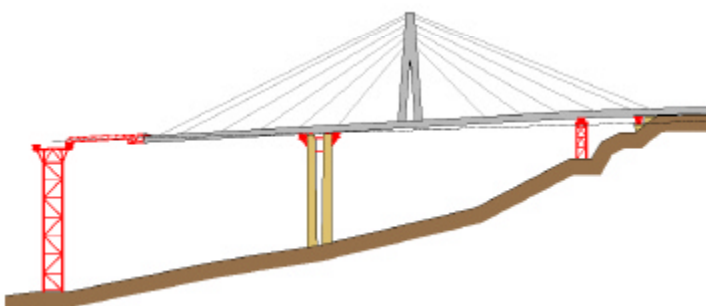
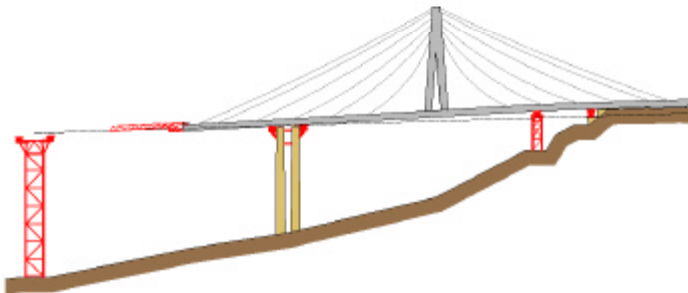
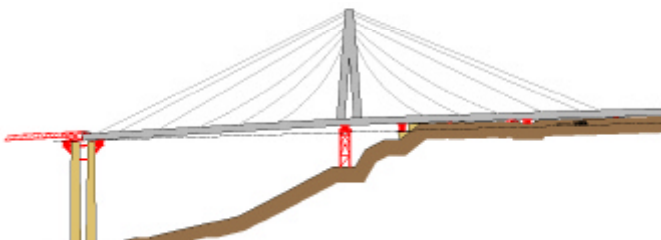
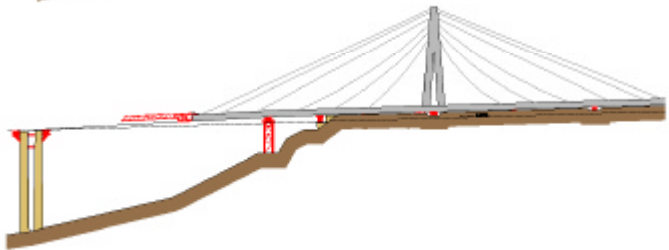
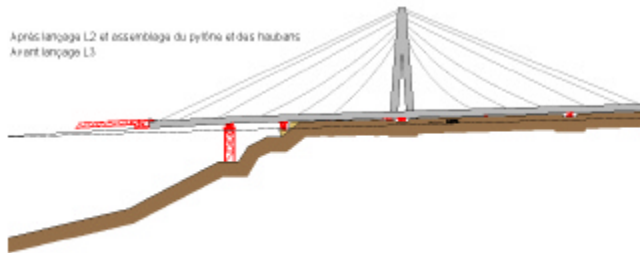
Lançage	Longueur d'avancement Etat du pylône	Particularités
<b>L1</b>	114 m	1 <sup>er</sup> test du système de translateur 1 <sup>er</sup> test du système de relevage sur S0
<b>L2</b>	114 m	Accostage de la 1 <sup>ère</sup> palée L2 se termine avec le tablier en porte-à-faux de 57 au niveau de $\pi 7$
<b>Entre L2 et L3</b>	-	Montage du pylône au droit de S1 Mise en tension de 6 haubans Mise en place de 6 haubans sans effort de prétension
<b>L3</b>	114 m Depuis S1 jusque $\pi 7$	Dénivellation de la palée $\pi 7$ alors que le pylône est sur C8 En fin de L3, - pylône sur la 1 <sup>ère</sup> palée - clouage du tablier sur $\pi 7$
<b>L4</b>	171 m Depuis $\pi 7$ jusque P7	Le pylône descend une dénivellation de 4,80 m Après un avancement de 85 m, réglage des 12 haubans pour permettre l'accostage du porte-à-faux Relèvement du porte-à-faux de 2400 mm au moment de l'accostage de la palée $\pi 6$ En fin de L4, - dépose du tablier sur les tabourets provisoires - clouage sur P7
<b>L5</b>	171 m Depuis P7 jusque $\pi 6$	1 <sup>er</sup> porte-à-faux de 171 m Accostage de la pile P6 par le dessus
...	171 m	... Si accostage sur une pile, possibilité de bloquer transversalement le porte-à-faux en cas de grands vents Si accostage sur une palée, clouage du tablier sur la pile en fin de lançage.

<b>L12</b>	171 m Pylône sur P3 (P2)	L12S (L12N)= Dernier lançage au Sud (Nord) Porte-à-faux de 171 m sans maintien de l'extrémité du tablier jusqu'au clavage
<b>Après L12S et L6N</b>		Clavage des tabliers Nord et Sud

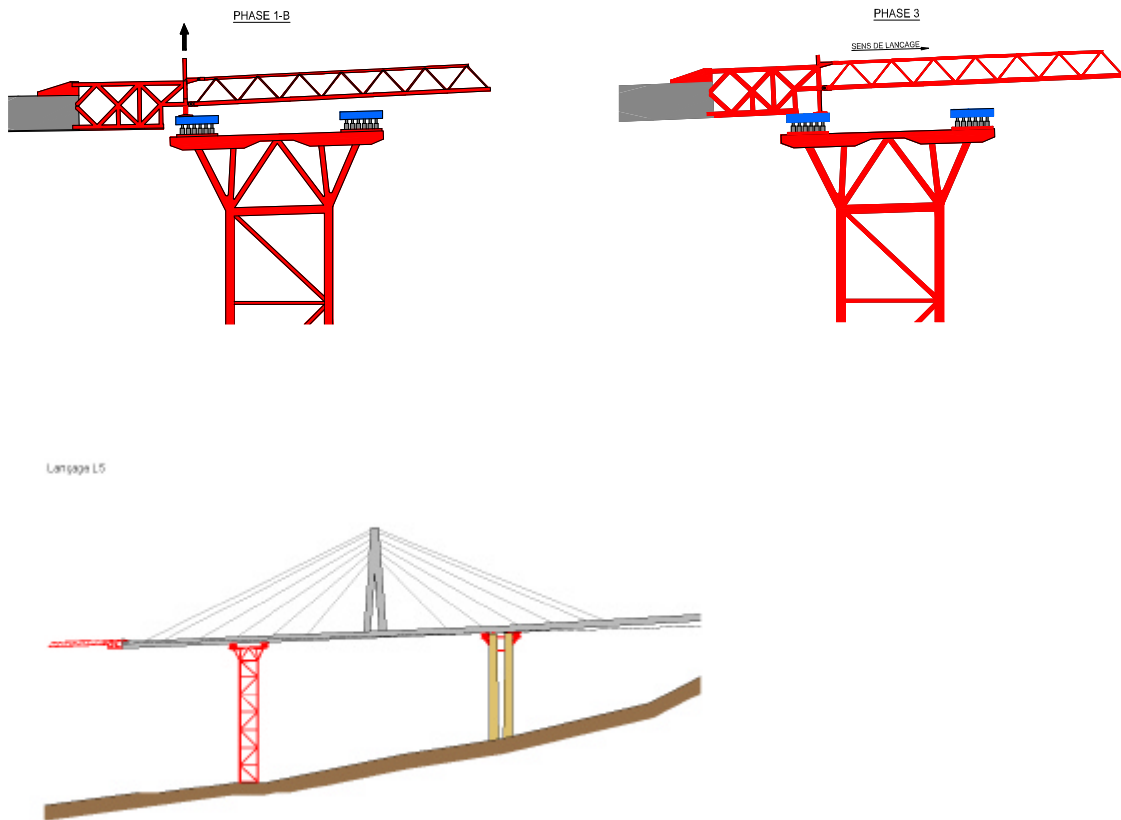
Fin du lançage L1



Après lançage L2 et assemblage du pylône et des haubans  
Avant lançage L3



Photos de lançages



### *Les opérations de post-clavage*

Le dernier lançage au Nord, L6N, eut lieu 3 semaines après le dernier au Sud, L12S. Dès la fin de la phase L6N, le tablier fût clavé par soudage sans avoir apporté de modification aux 2 sections d'extrémités tant la géométrie des 2 tabliers était parfaite. Le joint de clavage avait une dimension comprise entre 10 et 20 mm sur tout le pourtour de la section.

Alors que le clavage était toujours en cours de réalisation, les opérations de post-clavage démarraient:

- Assemblage des 5 derniers pylônes sur les plate-formes d'assemblage
- Transport des pylônes en position couchée, sur des kamags, convois composés de 10 essieux de 4 roues et distants de 90 m; le poids transporté sur le tablier était de 630 tonnes
- Relevage des pylônes
- Mise sur appuis définitifs du tablier au droit de chaque pile
- Mise en tension des haubans avec 70 % de leur réglage
- Mise an place du revêtement et des équipements
- Mise en œuvre du réglage définitif des haubans
- Epreuves





Photo pont terminé



### **3. LES PRINCIPALES ETUDES**

#### **3.1. Synthèse du dimensionnement de la structure**

Les principales sollicitations de l'ouvrage sont:

- Les charges permanentes: de l'ordre de 15 (??) tonnes par mètre de tablier
- La température: +35° C et -40° C dans le tablier avec une température de référence de 10°C
- Pour l'exploitation:
  - Les charges de trafic: chargement de type A(I)
  - Le vent: 205 km/h en vitesse de pointe au niveau du tablier
- Pour la construction:
  - Le vent: 185 km/h en vitesse de pointe au niveau du tablier

Les calculs du viaduc en service n'ont pas conduit à des difficultés majeures:

- Une étude détaillée de la dalle orthotrope a permis d'optimiser les épaisseurs de tôles et les dimensions des 160 km d'augets et des 600 cadres transversaux.
- La réduction du nombre de haubans a demandé une nouvelle optimisation du nombre de torons: 91 pour les haubans longs et 45 pour les courts.
- Le changement de matériau pour le pylône, du béton à l'acier, a exigé une nouvelle conception et un dimensionnement complet
- La conception de la liaison entre le pylône, le tablier et la pile ont fait l'objet d'une attention toute particulière.
- Les piles sont dimensionnées par la phase d'exploitation:
  - Par la température, pour les piles d'extrémité, les plus courtes: P1 et P7
  - Par les effets du vent, pour les autres piles: P2 à P6

La majeure partie des calculs de l'ouvrage ont été consacrés au dimensionnement de l'ouvrage pendant les phases de construction pour vérifier son comportement

- Lors des phases d'assemblage du tablier:
  - la configuration est qualifiée d'"arrêt normal"; le pylône de lancement (P2 ou P3) est situé au droit d'un appui, une pile ou une palée
  - la vitesse de pointe du vent est de 185 km/h
- Lors du lancement:
  - Le tablier est en mouvement
  - L'opération est entreprise sous un couvert météo de 3 jours; la vitesse de pointe du vent au niveau du tablier ne peut dépasser 85 km/h
- Lors d'un arrêt accidentel:
  - En cas d'une avarie quelconque soit des appareils de lancement, le mouvement du tablier est rendu impossible
  - En cas d'une alerte météo prévoyant une vitesse de vent supérieure à 85 km/h
  - La structure doit être mise en sécurité dans n'importe quelle situation pour des vents allant de 85 km/h à 185 km/h suivant le type d'alerte

#### **3.2. Dimensionnement en phase d'exploitation**

##### 3.1.1. Dalle orthotrope

La dalle orthotrope a fait l'objet d'un dimensionnement classique. Les critères de dimensionnement étaient fondés presque exclusivement par le comportement classique en fatigue par le passage des essieux.

Elle est constituée d'une tôle de platelage de 12 ou 14 mm en partie courante. Pour la résistance à la fatigue sous les voies de roulement, une épaisseur de 14 mm est maintenue sur toute la longueur de l'ouvrage. Ces épaisseurs sont augmentées dans la zone des pylônes.

Le raidissage est réalisé avec des augets de hauteur 300 mm suivant un entraxe courant de 600mm, l'axe du dernier auget se trouvant à 525 mm de la rehausse de la rive. Dans l'axe du tablier le platelage est raidi par 4 augets identiques à ceux définis ci-dessus. Les augets ont une ouverture de 300 mm en tête et une largeur de 200 mm à la base (dimensions extérieures). Leur épaisseur est de 7 mm.

### 3.1.2. Les haubans

Chaque travée est supportée par une nappe centrale de 11 paires de haubans ancrés dans les structures métalliques du tablier et des pylônes.

Ces haubans sont constitués de 45 à 91 torons de 150 mm<sup>2</sup> de section. La résistance d'un hauban peut ainsi varier de 12.500 à 25.000 kN.

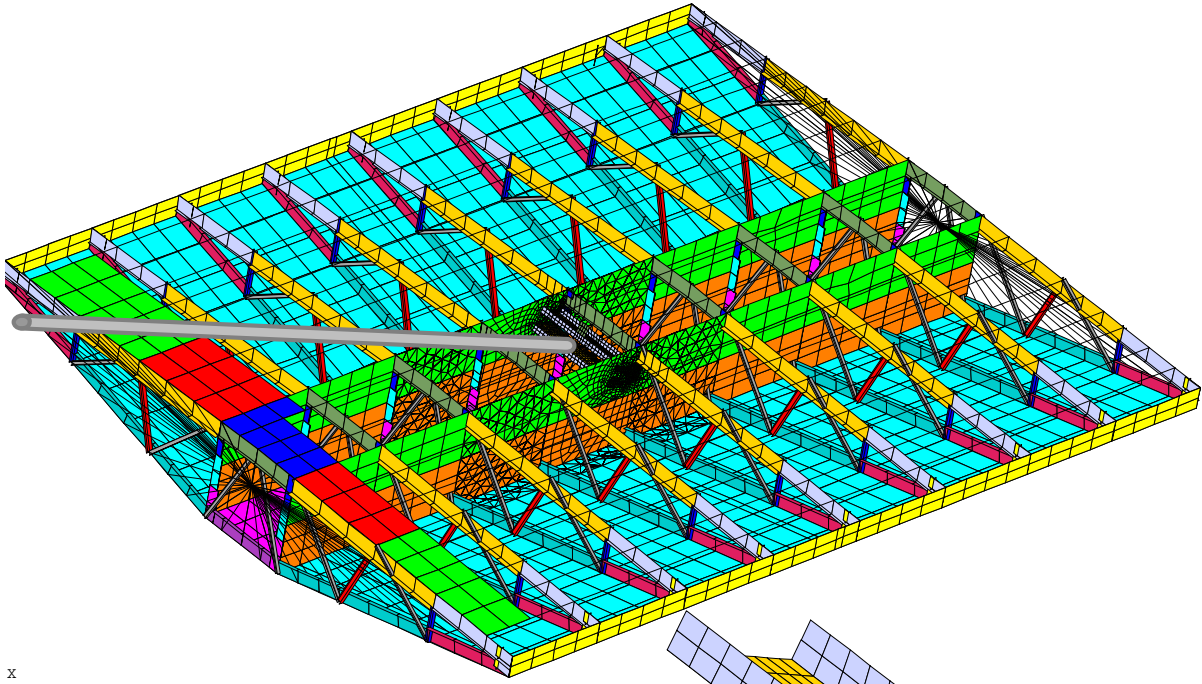
Chaque toron est galvanisé, ciré et protégé individuellement par une gaine en polyéthylène haute densité. L'ensemble des torons constituant un hauban est en outre protégé par une gaine générale de teinte gris clair

Les haubans sont ancrés sur le tablier à des intervalles réguliers de 12.51 m. La largeur de 4 m du platelage supérieur comporte 4 augets filants encadrant le tube de passage du hauban et le raidisseur central dans l'alignement de celui-ci.

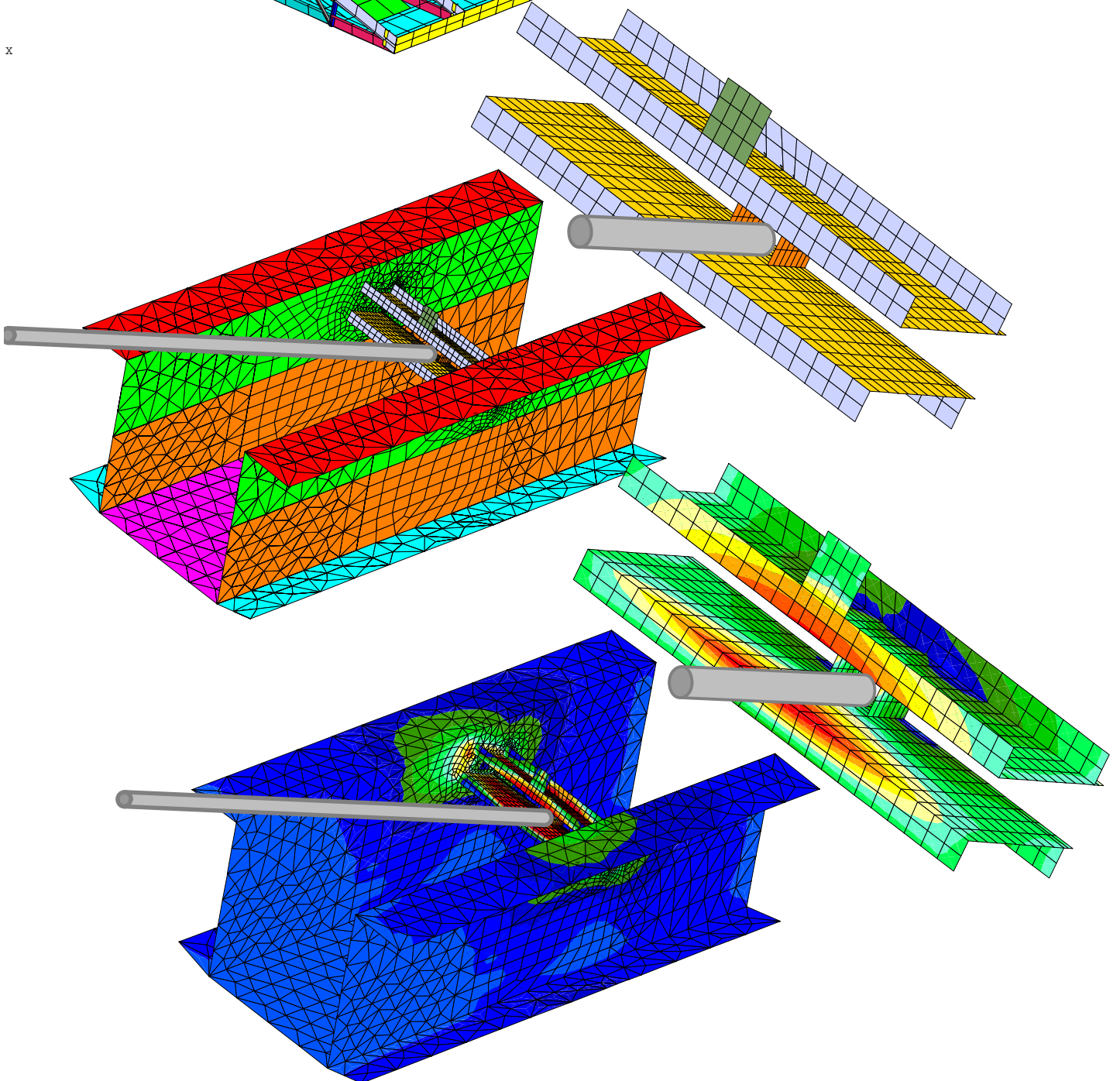
La traverse d'appui des ancrages de hauban est constituée de 2 poutres lames de persiennes en U adossées, une de chaque côté du hauban, qui transmettent l'effort tranchant aux âmes ; les deux membrures permettent de reprendre les efforts de flexion entre les 2 âmes.

La tête d'ancrage s'appuie sur les 2 lames de persienne et 2 raidisseurs intérieurs par l'intermédiaire d'une plaque d'appui de forte épaisseur.

Cet ancrage des haubans a fait l'objet d'un modèle éléments finis afin de déterminer la distribution des contraintes dans cette zone très perturbée.



x



### 3.1.3. Clouage du tablier sur les piles

Dans un pont à haubans classique qui comporte un ou deux pylônes, la travée principale est suspendue au pylône via ses haubans. L'équilibre du pylône est assuré par les haubans "arrière" qui s'ancrent dans une travée d'équilibrage soutenue par des appuis ou une culée d'ancrage fixe.

Le pylône ne transmet que des charges verticales et pourrait, théoriquement, être articulé longitudinalement en base sans que sa stabilité ne soit compromise.

Le cheminement des efforts de haubanage assure que la tête du pylône et par conséquent la travée principale suspendue soient peu déformables.

Dans le cas d'un viaduc multi-haubané, chaque travée est une travée principale. Lorsqu'on ne charge qu'une travée (cas des convois routiers par exemple), les haubans tirent sur les pylônes qui, s'ils ne présentent aucune rigidité propre, entraîne les travées adjacentes dans leur mouvement. Dans ce fonctionnement, seule la rigidité propre du tablier est mobilisée et le haubanage s'avère très peu efficace.

On est donc amené à épaissir le tablier, avec en contrepartie un fonctionnement peu satisfaisant et surtout une prise au vent accrue, très critique pour un ouvrage culminant à plus de 250 m d'altitude.

Un autre moyen consiste à stabiliser le pylône longitudinalement en tête pour empêcher ses déplacements et rendre les haubans efficaces. Pour y parvenir, on raidit suffisamment le pylône, on l'encastre sur les piles, qui elles-mêmes doivent alors présenter suffisamment de raideur pour rendre cette encastrement efficace.

C'est cette deuxième méthode qui est mise en œuvre sur le viaduc de Millau et qui justifie la dimension longitudinale accrue des pylônes (15,50 m) et la forme en V inversé.

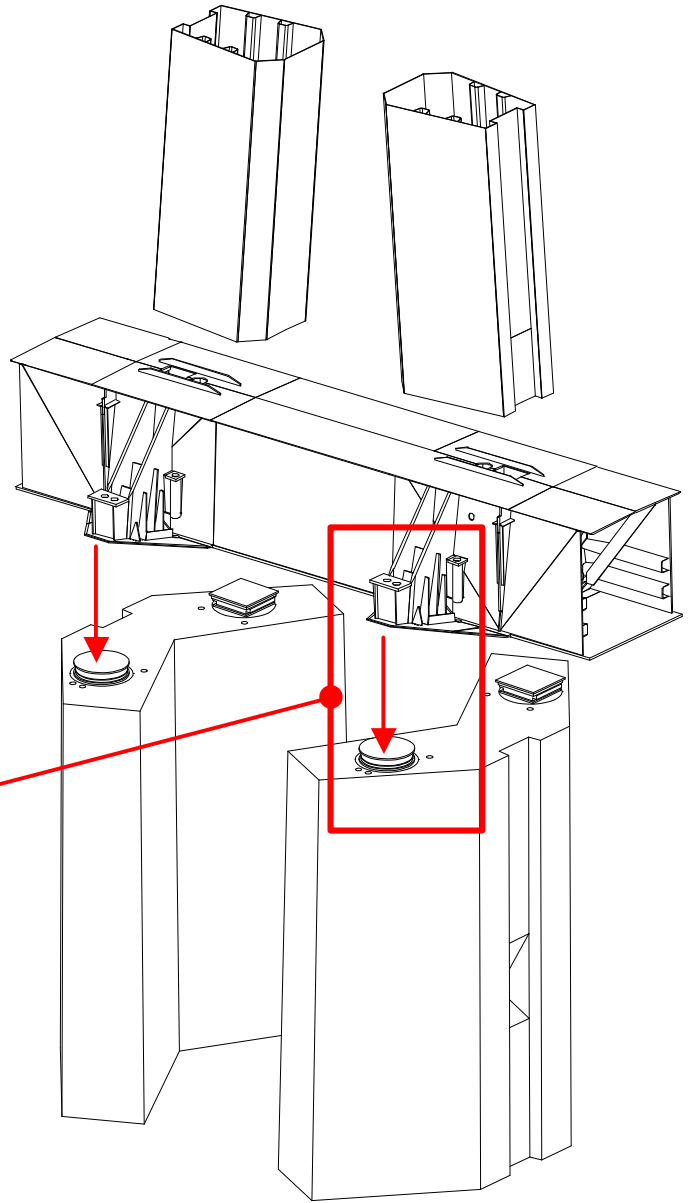
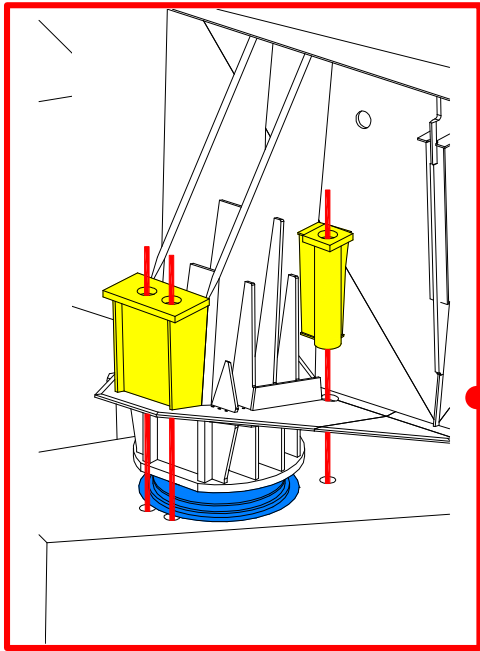
L'encastrement des pylônes et du tablier sur les piles a obligé le concepteur à prévoir une liaison rigide sans glissement en tête des pile; il implique la reprise d'efforts de traction et de compression. Les efforts de dimensionnement atteignent 8500 tonnes en compression et 2000 tonnes en traction.

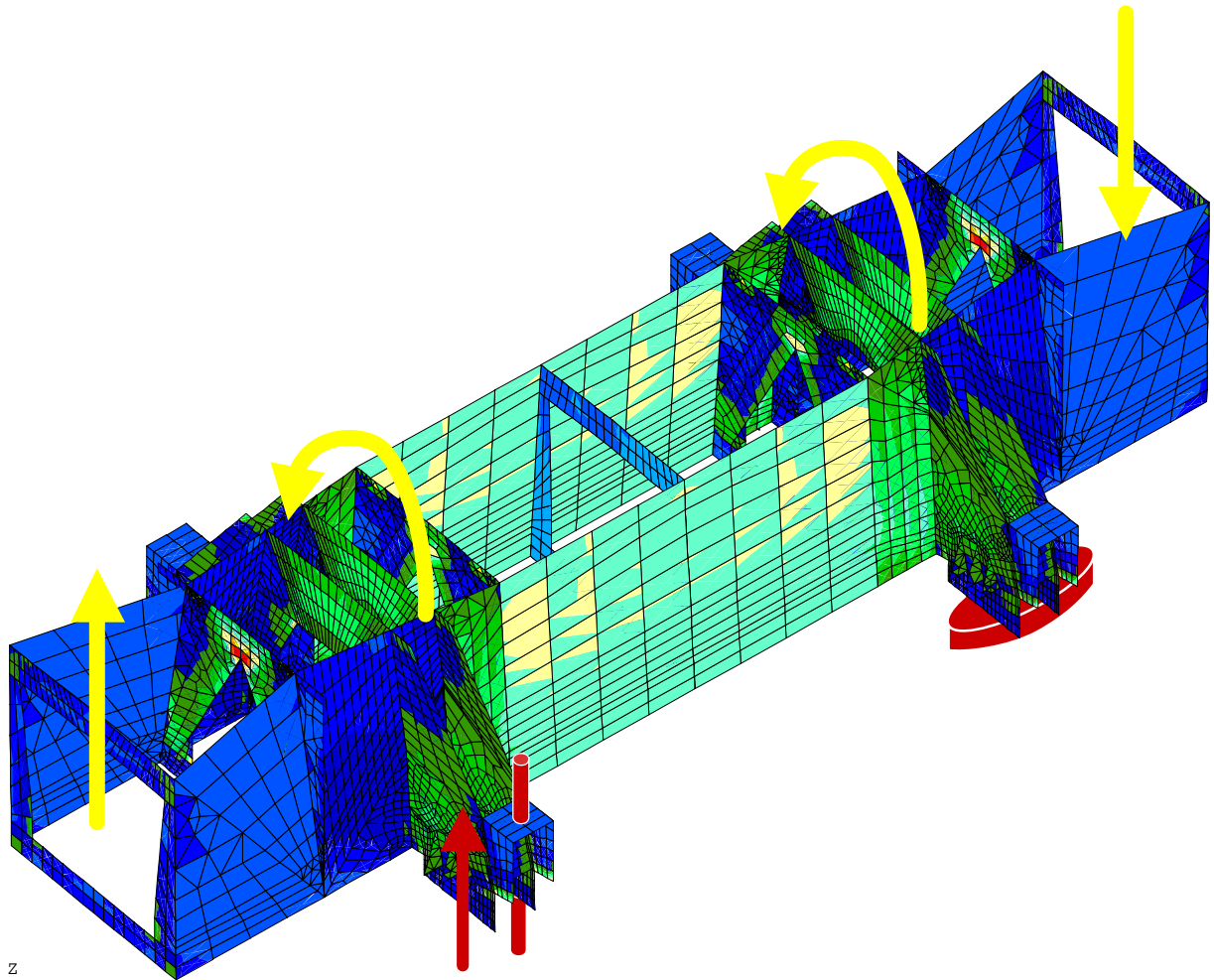
4 appareils d'appuis sont disposés sur la tête de pile. Les appuis utilisés sont des appuis métalliques à calottes sphériques, dans lesquels l'utilisation de matériaux innovants, tel que le DUB pour les surfaces de contact, a permis de rendre les dimensions compatibles avec celles très exigües de la tête de pile.

Les problèmes de soulèvement ont été résolus au moyen de clouages.

Au droit de chacun des 4 appareils d'appui sont installés 4 câbles 37 T15. Leur mise en précontrainte évitera tout décollement aux états limites de service, tandis que leur résistance assurera la stabilité d'ensemble aux états limites ultimes. Le soulèvement maximum à l'ELU a été calculé sur base d'un modèle par éléments finis de la partie centrale du caisson du tablier situé entre les 2 fûts des piles. Cette sous-structure était sollicitée par les efforts internes aux jambes du pylône et du tablier. La raideur des câbles de précontrainte était prise en compte.

Le soulèvement du tablier est une conséquence des caractéristiques du vent à 45°. En effet, les études ont montré que, sous ce vent, les effets verticaux étaient encore plus importants que pour les vents transversaux alors qu'intuitivement, on pouvait légitimement supposer l'inverse.





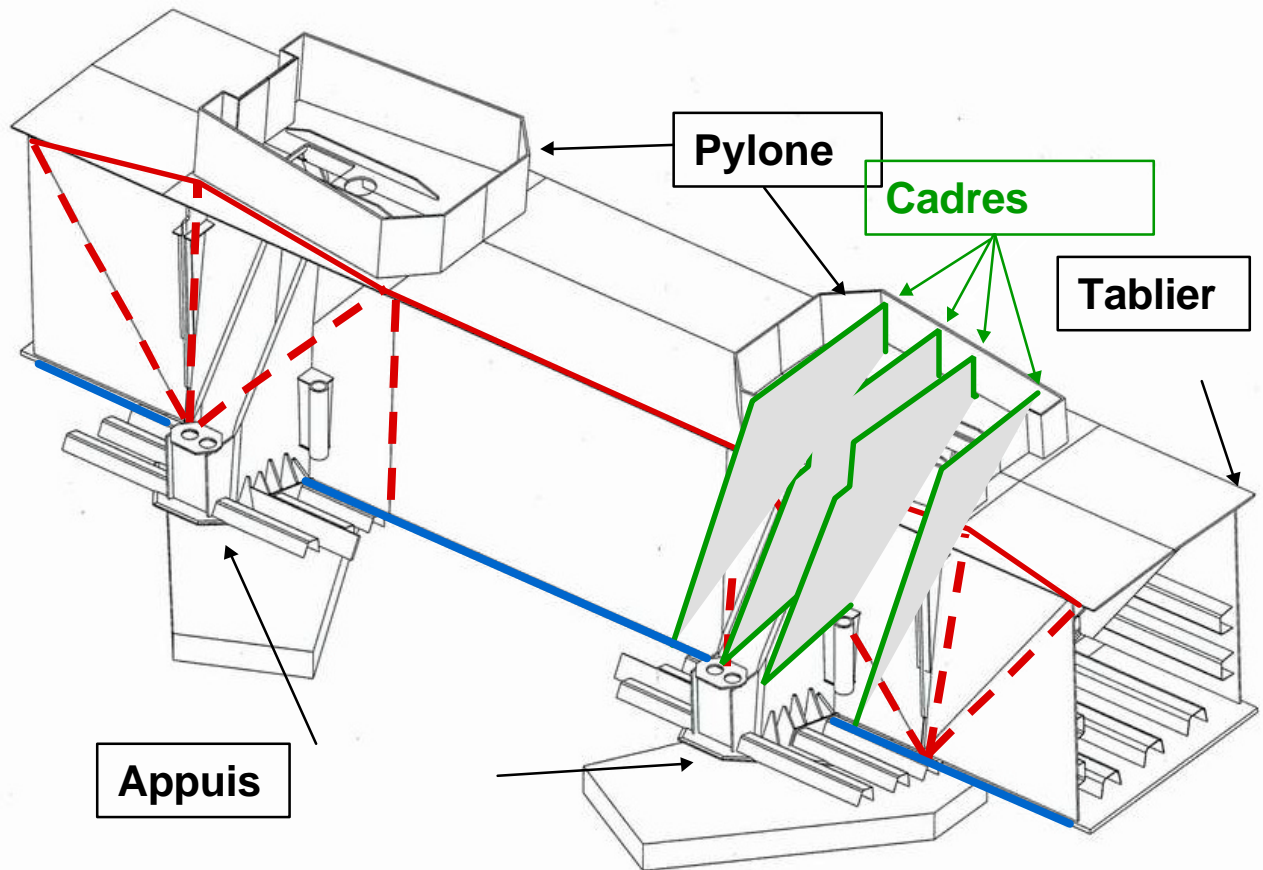
2  
1

### 3.1.4 Liaison entre le tablier, le pylône et les piles

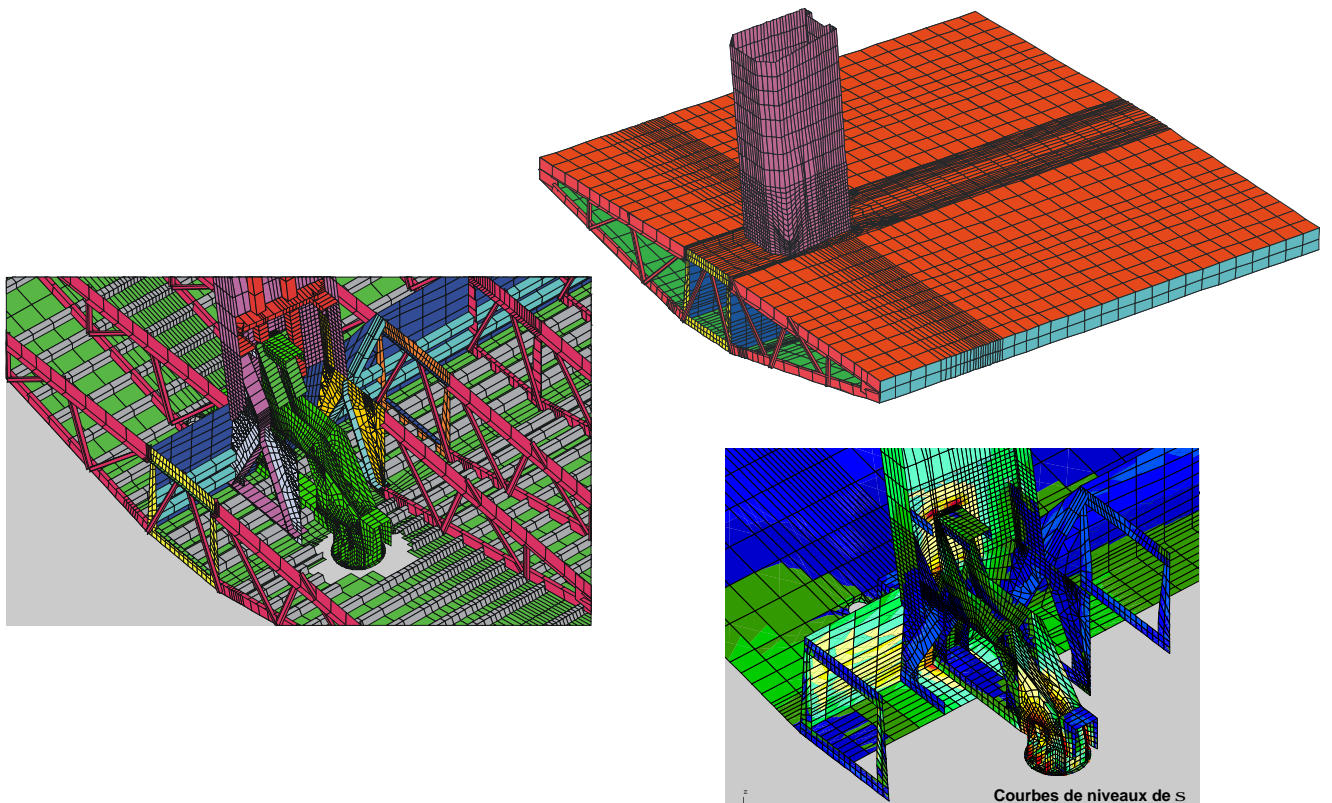
La solution développée permet, sans perturber le fonctionnement du tablier, aux sollicitations du pylône de descendre vers des cadres transversaux, en vert, qui transmettent leur charge sur les appareils appuis, soit directement, soit en transitant via les âmes du caisson central en rouge.

Les âmes ont été déviées en partie supérieure pour s'adapter à la forme du pylône, grâce à un jeu de tôles triangulaires qui présentent à chaque pli une arête commune.

C'est dans cette zone que les tôles les plus fortes ont été utilisées, jusqu'à 100 mm d'épaisseur en acier S460.



Après conception et pré-dimensionnement, l'ensemble a fait l'objet d'un calcul par éléments finis de type plaque avec le programme FINELG. La figure présente le modèle de calcul et un détail de la discrétisation où apparaissent en vert les cadres principaux de transfert des efforts. Le modèle comprenait 100.000 équations.



## **3.2. Dimensionnement en phase de construction**

### 3.2.1. Montage et lancement du tablier

Les calculs du tablier pendant sa période de lancement ont fait l'objet d'un maximum d'attention. Plus qu'une validation, un nouveau dimensionnement a été établi lors des calculs des lancements, calculs qui ont probablement constitués à eux seuls plus de 75 % des heures d'études d'exécution consacrées à l'ensemble du viaduc.

3 situations dans lesquelles le tablier peut se trouver durant sa mise en œuvre ont été prises en considération. Ces situations sont différenciées suivant la durée de leur survenance.

- L'assemblage du tablier: la majeure partie du temps, l'ouvrage est fixe. Le montage est en cours sur la plateforme et le pylône se trouve au droit d'un appui. Le tablier est dans cette situation pendant 90% du temps.



- Le lancement: durant 3 jours toutes les 4 à 5 semaines, on procédait à un lancement de 171 m. Le porte-à-faux passait ainsi d'une pile à une palée ou d'une palée à la pile suivante. Cette opération avait lieu sous couverture météorologique.



- L'arrêt accidentel: durant ces 3 jours de lancement, les opérations pouvaient être interrompues pour une raison à priori inconnue.

A chacune de ces trois situations ont été associées des hypothèses de calculs spécifiques. Elles sont résumées dans le tableau ci-dessous.



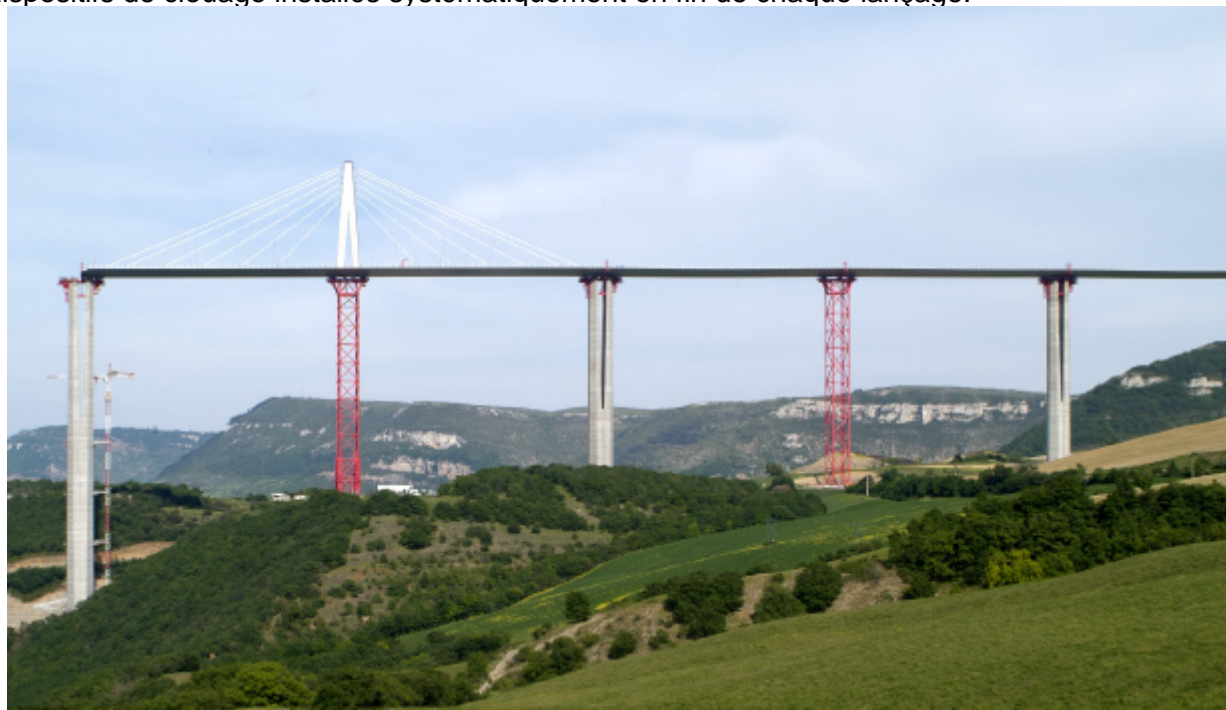
Configuration	Pondérations des charges		
	Charges permanentes	Vent	Vitesse du vent
<b>Assemblage</b>	1,35	1,50	185 km/h
<b>Lançage</b>	1,35	1,50	85 km/h
<b>Arrêt accidentel</b>	1,10	1,20	185 km/h

Pour les arrêts accidentels, dont la durée n'était pas connue à priori, l'ouvrage devait être à même de résister au vent de construction, soit 185 km/h. Toutefois, pour tenir compte de sa faible probabilité d'occurrence, sachant que le lancement était mis en oeuvre dans une période de couverture météorologique, les coefficients de sécurité étaient réduits à 1,10 sur les charges permanentes et 1,20 sur les effets du vent. Dans cette situation, la mise en oeuvre de mesures d'accompagnement pouvaient s'avérer nécessaire, pour éviter notamment des décollements d'appui.

Au cours des 18 lancements, le chantier a subi deux arrêts temporaires de très courte durée pour cause d'orages. Dans chaque cas, la durée de l'arrêt n'a pas dépassé une nuit. Aucun arrêt accidentel n'a été à déplorer.

#### *Configurations d'assemblage*

Pour chaque situation d'assemblage, entre deux lancements, le pylône se trouve à l'aplomb d'une pile ou d'une palée. Chacune de ces situations a fait l'objet d'une modélisation et d'un calcul des sollicitations, essentiellement sous les effets du vent. La prise en compte des vents à 45° par rapport à l'axe du viaduc a mis en évidence l'apparition de traction sur les appuis de part et d'autre du pylône, tractions qui ont demandé la mise en oeuvre de dispositifs de clouage installés systématiquement en fin de chaque lancement.



D'autre part, l'ouvrage allait se trouver dans cette situation durant plusieurs semaines. L'assemblage sur la plateforme, jusque 1600 mètres en arrière du porte-à-faux devait avoir lieu sans subir les mouvements provoqués par des dilatations thermiques.

Un dispositif appelé point fixe, maintenait le tablier immobile longitudinalement à proximité de la zone d'assemblage.

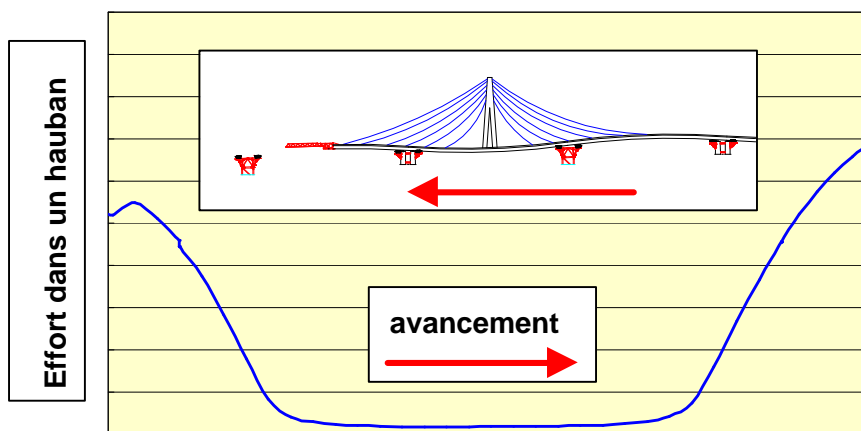


### Configurations de lançage

L'analyse du comportement du tablier a été réalisée au moyen du logiciel FINELG, sur base d'un modèle évolutif. Celui-ci faisait se déplacer le tablier sur ses appuis par pas de 5 mètres; environ 600 étapes de calculs non linéaires ont été nécessaires.

Le modèle prenait en compte

- La souplesse des appuis: sous la charge maximum de 7000 tonnes, une palée provisoire pouvait se raccourcir verticalement de 8 centimètres.
- La variation des niveaux d'appui.
- Les décollements éventuels
- les accostages de l'appui suivant.
- le comportement non linéaire des haubans, dû à la détension des haubans lorsque le pylône de lançage se trouvait à mi-portée d'une travée.



La figure illustre l'évolution des efforts dans les haubans au cours d'un lançage de 171 m. Au début d'un lançage, le pylône quitte un appui. Aucune déformation significative du tablier n'est observée et les haubans sont tendus.

Au fur et à mesure que le pylône avançait, le tablier se déformait, le pylône descendait et les haubans se détendaient en libérant le pylône des charges auxquelles il était soumis. Lorsque le pylône se trouvait au milieu de la travée, tous les haubans étaient détendus. AU  $\frac{3}{4}$  des 171 m du lançage, le pylône se cambrait pour remonter sur l'appui avant; les haubans retrouvaient alors leur efficacité et supportaient à nouveau le porte-à-faux.

## Lançage L3 : Pylône de S1 à P17

+025 m	: abaissement C8	-250 mm
+041 m	: relèvement C8 et S1	+100 mm
+081 m	: relèvement C8	+200 mm
+081 m	: abaissement P17 et C8	-256 mm et -200 mm
+081 m	: relèvement S1	+300 mm
+094 m	: abaissement P17	-130 mm
+094 m	: abaissement graduel de P17	-270 mm

