

OUVRAGES D'ART

CENTRE DES TECHNIQUES D'OUVRAGES D'ART

Bulletin de liaison dirigé par
le Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art
du Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes



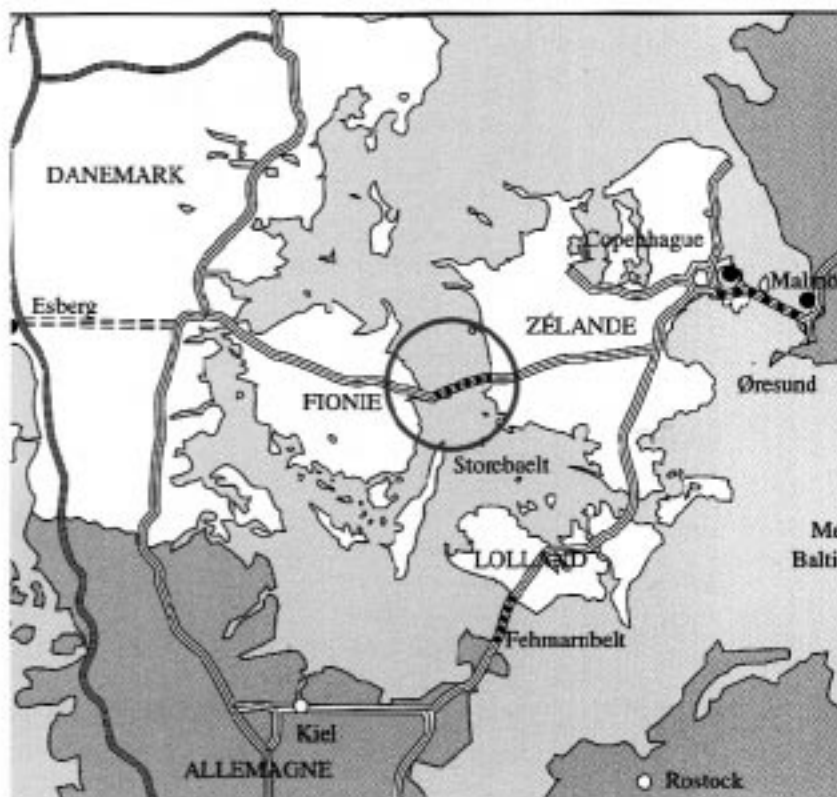
N° 25
Novembre 1996

Le point sur le projet du Grand Belt au Danemark

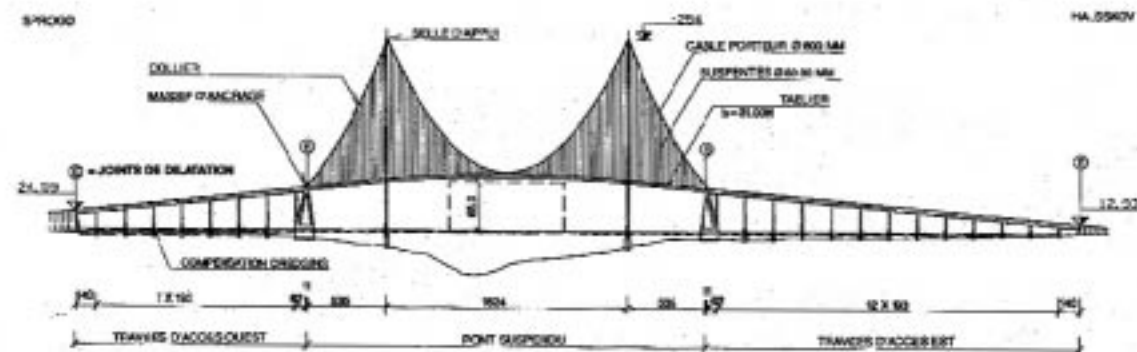
Introduction

Les travaux de la traversée du Grand Belt, détroit entre l'île de Sjælland et l'île de Fionie au Danemark sont maintenant dans leur phase finale, après 7 années de travail intensif sur le site. Le montage des câbles porteurs du pont suspendu, Pont Est, est en cours. La traversée ferroviaire sera mise en service en juin 1997 et la traversée routière sera ouverte en juin 1998.

La longueur totale de la traversée est de 17,5 km avec trois ouvrages principaux. Un double pont ferroviaire et routier de 6,6 km de long entre l'île de Fionie à l'Ouest et la petite île de Sprogø vers l'Est qui sépare le Grand Belt en deux parties égales.



Un tunnel ferroviaire à deux tubes forés de 7,5 km entre l'île de Sjælland à l'Est et l'île de Sprogø. Enfin le grand pont suspendu et ses travées d'accès, entre l'île de Sjælland et l'île de Sprogø, pour une longueur totale de 6,8 km.



Les deux premiers ouvrages mentionnés sont achevés. Les travaux d'installation des équipements électriques de service et de signalisation dans les tunnels sont en cours d'achèvement. Les travées d'accès pour le pont suspendu sont en place, prêtes à recevoir le revêtement. Le coût total des travaux se situera à environ 30 milliard de francs 1996.

Nous ne reprendrons pas dans cet article toute la genèse du projet qui a déjà fait l'objet de nombreuses communications et publications dans les congrès internationaux, le dernier en date en juin 1996, à Copenhague (Congrès

IABSE). Nous préférons nous concentrer sur le pont suspendu et ses travées d'accès, dit Pont Est.

Nous aborderons seulement certains aspects particuliers comme l'esthétique du pont, le choix des aciers, la préfabrication, la déshumidification des poutres du caisson en acier, les appareils d'amortissement des vibrations, le montage des câbles porteurs, les suspentes et les amortisseurs hydrauliques entre tablier et massifs d'ancrages.

Les caractéristiques principales du Pont Est sont résumées dans le tableau page suivante.

Élévation

Des caractéristiques supplémentaires seront données au besoin dans les différentes parties de cet article.

Les entrepreneurs pour la structure sont COINFRA (Italie) et G.E.C-Alsihom par sa filiale SDEM pour le montage.

Caractéristiques Dimensions Quantités	Unités	Travées d'accès Ouest Côté SPROGØ	Pont Suspendu	Travées d'accès Est Côté HALSSKOV
Longueur totale	m	1567	2694	2529
Longueur des travées	m	143 + 7 x 193 + 73	535 + 1624 + 535	73 + 12 + 193 + 140
Gabarit maritime	m	-	400 x 65	-
Tablier, Caisson acier	m	Continu : 1567	Continu : 2694	Continu : 2569
<i>Hauteur</i>	m	6,7	4,0	6,7
<i>Largeur</i>	m	25,1	31,0	25,1
Voies de circulation		2 x 2 + Voies de secours		
Acier de construction <i>Fe 420 KTTM</i>	t	17000		28000
<i>Fe 510 D</i>	t	2000	30000	3000
Longueur totale de sou- dure	km	450	700	700
Revêtement	m ²	40000	65000	65000
Câbles Porteurs <i>Diamètre</i>	m		0,827	
<i>Section métallique</i>	m ²		0,424 (air % = 21)	
<i>Longueur</i>	m		3000 m	
Composition par câble			37 câbles élémentaires à 504 fils, diamètre 5,38 mm. Total 18648 fils	
Quantités : 2 câbles	t		20000	
Résistance à la rupture	N/mm ²		1570	

La Joint Venture COWI et Rambøll (Ingénieurs Conseils au Danemark) a fait les études pour Storebæltsforbindelsen A/S et a fourni l'assistance technique au cours de la construction.

Esthétique d'ensemble du pont suspendu et des travées d'accès

L'ensemble de l'ouvrage répond-il aux critères d'esthétique souhaités tels que "l'harmonie de l'ouvrage dans son environnement, l'élégance des formes et des lignes, le respect des proportions, l'accent mis sur la fonctionnalité des éléments", sans négliger pour autant les conséquences économiques liées aux solutions architecturales adoptées ?

D'une façon générale, le Maître d'Ouvrage, les Ingénieurs et les Architectes qui ont travaillé ensemble, en amont, ont eu la main heureuse pour choisir les solutions architecturales. Le choix des solutions montre qu'il n'y a pas de conflit entre la fonctionnalité et l'harmonie de l'ensemble de l'ouvrage.

■ Le Pont Suspendu

La fonctionnalité des éléments principaux d'un pont suspendu (pylônes, massifs d'ancrage des câbles, tablier) est si évidente qu'il n'est pas nécessaire de la souligner. Pourtant, il existe une grande variété de choix dans le dessin de chacun de ces éléments.

Les embases des pylônes sont immergées en permanence et seuls les fûts et la poutre transversale inférieure émergent au dessus du niveau de l'eau, ce qui donne aux pylônes une élégante simplicité. Les fûts ont une section rectangulaire avec une embase légèrement élargie, ce qui renforce l'effet de robustesse. La cassure discrète se fait au niveau du tablier, à 65 m au dessus de la mer.

La poutre transversale intermédiaire qui habituellement se situe sous le tablier, a été placée au niveau 137 m. Cette disposition renforce l'effet du tablier continu au droit des pylônes. Une poutre transversale sous le tablier aurait créé l'impression erronée que le tablier était supporté au niveau des pylônes. Les poutres transversales intermédiaires et supérieures



sont en forme de dièdre, ce qui réduit de beaucoup leur massivité et crée de beaux effets d'ombres. L'impression d'ensemble est simple, élégante, fonctionnelle.



Le choix des dispositions architecturales pour les massifs d'ancrage respecte les mêmes principes. Seuls les triangles qui reprennent les efforts des câbles, émergent de l'eau. La fonctionnalité des structures est clairement définie. Ces ancrages, souvent extrêmement massifs,



sont ici aérés et respectent l'harmonie d'ensemble.

Le tablier est un trait simple, continu d'un massif d'ancrage à l'autre. Le profil aérodynamique souligne son élégance.

■ **Travées d'accès**

Comme pour les pylônes, seuls les fûts des piles en béton émergent de l'eau, les embases étant immergées en permanence. Par similitude avec la base des pylônes, la base des piles ici aussi est élargie. Les proportions - hauteur de poutre constante 6,7 m, portées 193 m - sont harmonieuses. Les culées sont très discrètes. Une échancrure importante au sommet des piles entre les appuis souligne le chemin de transfert des forces du tablier aux appuis.

■ **Choix de la couleur**

Les tabliers sont peints, en bleu marine très foncé. Cette peinture laquée qui reflète la lumière et la mer, crée des effets qui s'harmonisent parfaitement avec les nuances de l'eau du Belt qui varient continuellement du vert foncé au bleu marine presque noir selon l'ensoleillement et l'état de la mer.



Massif d'ancrage

Pylône en béton, hauteur 254 m

Entretoises intermédiaire et supérieure en forme de dièdre

Le tablier des travées d'accès

Les dispositions adoptées n'ont pas entraîné d'investissements supplémentaires et l'ensemble s'intègre bien dans l'environnement marin.

Choix des aciers

80000 tonnes d'acier de construction, 20000 tonnes de fils acier haute résistance, galvanisés pour les câbles porteurs, 800 tonnes de suspentes. Ces quantités sont impressionnantes et le choix des matériaux est un facteur important de l'économie du projet.

■ Fils pour Câbles Porteurs :

(voir paragraphe : Montage des câbles, page 9)

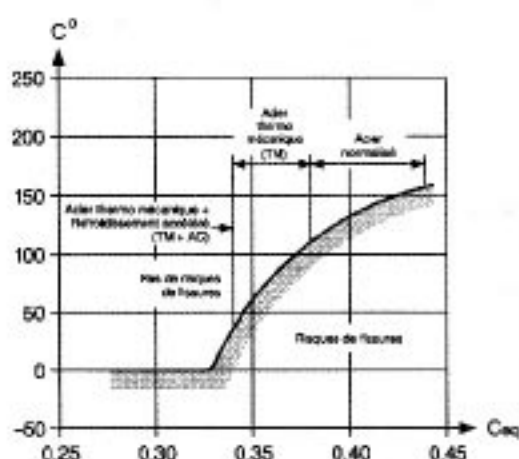
■ Aciers de construction :

Les 80000 tonnes se répartissent à parties égales entre la qualité Fe E 420 KT.TM¹, selon la norme EN10113 et utilisée principalement sur les travées d'accès et la qualité Fe 510 D selon la même norme. Le choix de la qualité Fe E 420 KT.TM pour les travées d'accès a été guidé par le souci de réduction du poids propre des poutres de 193 m qui pèsent 2400 tonnes.

Nous n'insisterons pas sur la qualité Fe 510 D qui est d'un emploi classique sur les ouvrages d'art. Par contre il est plus intéressant d'examiner les avantages de l'emploi de la qualité Fe E 420 KT.TM., qui est normalement un acier à tubes. Il y a au moins trois avantages appréciables : Réduction du poids propre de la construction, réduction des coûts de mise en œuvre en raison des épaisseurs réduites des tôles, et surtout meilleure soudabilité.

La possibilité de réduire le poids propre de la construction est limitée par des contraintes qui en amoindrissent l'effet. Des épaisseurs de tôles minimum de 10 mm pour l'enveloppe du caisson et 12 mm pour la dalle orthotrope du tablier sont imposées pour des raisons de résistance à la corrosion ou de résistance à la fatigue. Les épaisseurs réduites ne sont pas forcément compatibles avec la stabilité des panneaux dans les zones de compression. Enfin il est plus difficile de satisfaire les conditions de planéité aux soudures sur des tôles d'épaisseurs réduites. Tous ces aspects restreignent la réduction des épaisseurs.

1. Les nouvelles dénominations des qualités d'aciers sont les suivantes : S420 ML pour l'acier Fe E 420 KT.TM et S355 K2G3 pour l'acier Fe 510 D.



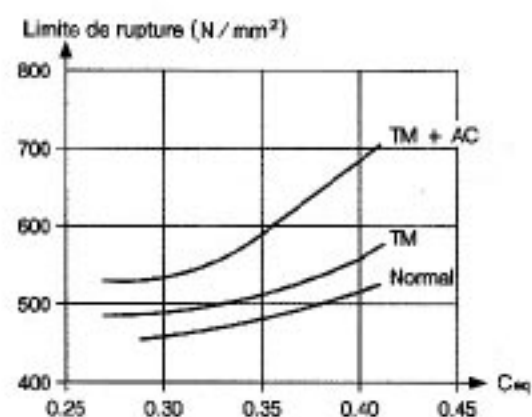
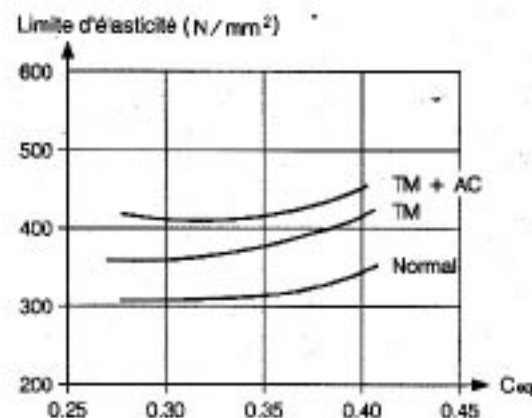
$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (\%)$$

Tôle t = 25 - 40 mm. Energie de soudage 1,7 KJ/mm.

Toutefois quand ceci est possible en tenant compte des remarques ci-dessus, il est évident que la réduction des épaisseurs a un impact direct sur les coûts de préparation en usine, sur le découpage, sur les coûts de rabotage par soudure, moins ou même pas du tout de préchauffage, moins de défauts de soudure du fait de la réduction du volume de métal déposé, moins de frais de contrôle et de réparation. Tous ces effets agissent dans le même sens et deviennent rapidement appréciables.

Un effet significatif qui s'ajoute à ceux déjà mentionnés est celui de l'amélioration de la soudabilité estimée par la valeur du carbone équivalent Ceq. Les tôles en acier TM (Thermo Mécanique) sont caractérisées par un Ceq extrêmement bas (0,33-0,35). Elles sont fabriquées à partir d'une analyse où la teneur en carbone est faible (0,09-0,10 %), les caractéristiques mécaniques de l'acier étant obtenues par l'addition de micro alliages et par un laminage contrôlé dans un intervalle de température limité avec des réductions progressives d'épaisseurs bien déterminées. Le résultat est un acier aux caractéristiques mécaniques élevées avec une valeur de Ceq très basse, donc avec une bonne soudabilité et tous les avantages qui en résultent au niveau de la fabrication. Les risques de défauts de soudure, graves comme fissures à chaud ou fissures dues à l'hydrogène dissous

sont réduits. L'utilisation de ces aciers a un impact direct sur le niveau de la qualité.



Préfabrication

Un projet de cette importance ne se conçoit pas sans une étude préalable des conditions de fabrication et de montage. Nous nous limiterons à la fabrication des caissons en acier de la structure du pont suspendu et des travées d'accès. Les mêmes principes généraux ont servi de guide pour les structures en béton des ponts Ouest ferroviaire et routier. Trois cent vingt cinq éléments de 7000 t de poids unitaire maximum ont été préfabriqués en usine et mis en place d'une seule levée.

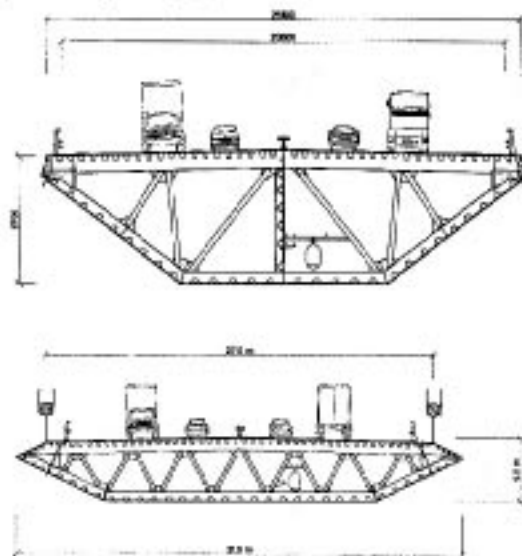
Ces principes sont les suivants : Fabrication en usine des plus grosses unités compatibles avec les moyens de transport et de levage sur le site afin de limiter autant que possible les travaux sur le chantier.

L'application de ces principes pour les caissons en acier du pont suspendu et des travées d'accès a conduit aux avantages suivants :

- *Standardisation et rationalisation des méthodes de préparation, de fabrication et d'assemblage*

- *Amélioration des moyens de contrôle de qualité et économie globale.*
- *Amélioration du niveau moyen de qualité.*
- *Plus grande indépendance vis à vis des conditions climatiques.*

Le projet a donc été établi en prévision d'un taux élevé de préfabrication. Le découpage du tablier en modules sensiblement identiques de 16 ou 20 m de longueur avec des raidisseurs transversaux tous les 4 m a permis de standardiser la fabrication d'environ 7000 panneaux de 4 m de largeur sur 16 ou 20 m de longueur (21 panneaux pour une section des travées d'accès et 17 panneaux pour une section du pont suspendu).



Relation entre Ceq et les propriétés mécaniques dans trois procédés de fabrication

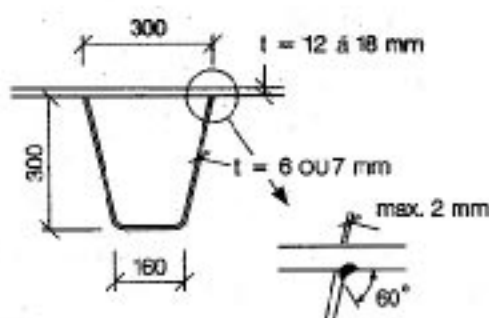
Travées d'accès - Coupe transversale du tablier

Pont suspendu - Coupe transversale du tablier

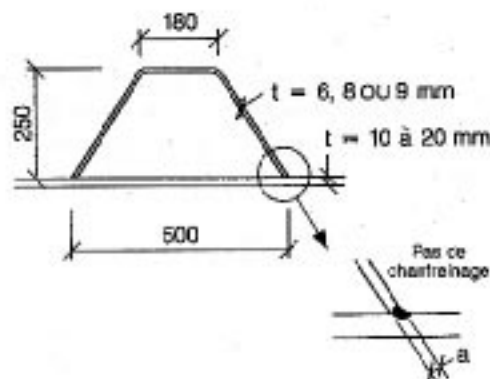
Ces panneaux sont constitués de tôles raidies longitudinalement par des augets trapézoïdaux assemblés aux tôles par soudage automatique sur des machines à 4 et 6 têtes de soudage et transversalement tous les 4 m par des poutres en T reconstituées soudées aux tôles par soudage semi automatique. Il y a environ 1000 km de soudures longitudinales augets/tôles de platelage. Ces soudures sont faites par soudage automatique sous flux en poudre ; les panneaux sont précambrés avant soudage. Cette préfabrication s'est faite chez CMF, près de Pise, en Italie.

Les panneaux des travées d'accès ont été transportés à Sines au Portugal, à 120 km au sud de Lisbonne, assemblés en section de pont complète de 40 m de longueur et peintes extérieurement avec la couche finale. Ces sections ont ensuite été transportées au Danemark, à Aalborg au Nord du Jutland pour être assemblées en poutres de 193 m et 2400 t. Ces poutres ont enfin été mises en place sur les piles au moyen de 2 grues de 1400 t chacune.

Auget type R1 pour dalle orthotrope



Auget type R2, raidisseur de fond et des flancs



Ce même procédé de préfabrication est en cours pour les unités de levage de 48 m et 550 t du pont suspendu. La préfabrication des sections se fait en partie à Sines et en partie à Tarante au Sud de l'Italie. G.E.C-Alsthom/SDEM assure le montage et les 23 poutres des travées d'accès sont maintenant en place.

Protection contre la corrosion par déshumidification

Comment minimiser les coûts de protection contre la corrosion ?

Les tabliers des travées d'accès et du pont suspendu sont des poutres en caisson fermé, étanches. Les surfaces extérieures exposées aux intempéries (vent, pluie, soleil, sel, gel) sont lisses sans raidisseurs apparents. Ce sont des paramètres essentiels pour réduire les coûts initiaux de protection contre la corrosion. Tous les raidisseurs sont donc intérieurs. Le rapport surface extérieure / surface intérieure est d'environ 1 à 4. Ce rapport est presque constant pour tous les types de poutres en caisson fermé.

Considérant que les surfaces extérieures pour toute la longueur du tablier (6900 m) représentent environ 250000 m², les surfaces intérieures représentent 1000000 m². Ces chiffres démontrent l'intérêt de l'optimisation de la solution de protection anticorrosion.

COWI a développé il y a 25 ans une méthode particulière pour résoudre ce problème :

- Surfaces extérieures : peintes comme à l'ordinaire.
- Surfaces intérieures : aucune protection par peinture.

La corrosion est inhibée par circulation d'air asséché à moins de 60 % d'humidité relative dans le caisson étanche ; en effet sous ce seuil d'humidité le phénomène de corrosion ne se produit pas.

Ce principe a été adopté en 1970 pour la première fois sur la poutre en caisson du pont suspendu sur le Petit Belt au Danemark. L'efficacité du système est maintenant bien démontrée. Des plaques témoins, sablées à blanc au moment de la construction (il y a 25 ans) et placées à l'intérieur du caisson aux endroits les plus exposés (portes d'accès au caisson), sont intactes, sans signe de corrosion.

Le système a été adopté sur d'autres ouvrages, entre autres sur le Pont de Færø au Danemark et récemment en France sur le Pont de Normandie, et maintenant à très grande échelle sur le Pont du Grand Belt.

Les coûts d'investissement initiaux sont réduits (5 à 7 % du coût d'une peinture intérieure). Dans chaque longueur de caisson de 400 m environ, un appareillage de déshumidification et des ventilateurs, adaptés au volume total de l'air emmagasiné, assurent la circulation de l'air asséché après absorption de l'humidité au dessus du taux fixé. Des entrées d'air frais sont prévues pour améliorer la qualité de l'air en cas d'inspection ou d'intervention dans le caisson ou pour égaliser les différences de pression intérieures et extérieures, dues aux variations de température.

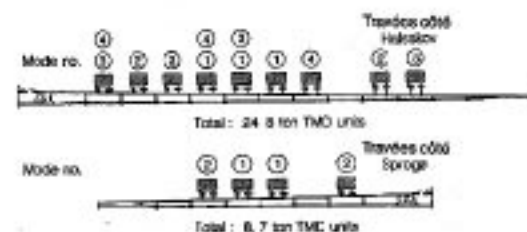
L'appareillage est robuste, fonctionne automatiquement et les frais d'exploitation (consommation d'énergie électrique), sont largement inférieurs aux coûts d'entretien et de réparation des peintures éventuelles.

Amortissement des vibrations

Les études aérodynamiques exécutées sur les travées d'accès ont révélé des vibrations verticales à des vitesses de vent supérieures à 15 m/s, dans le cas où les travées devraient être équipées d'écrans de protection contre le vent latéral ou au cas où les travées seraient bloquées par un bouchon de camions. Ces vibrations proviennent des écoulements tour-

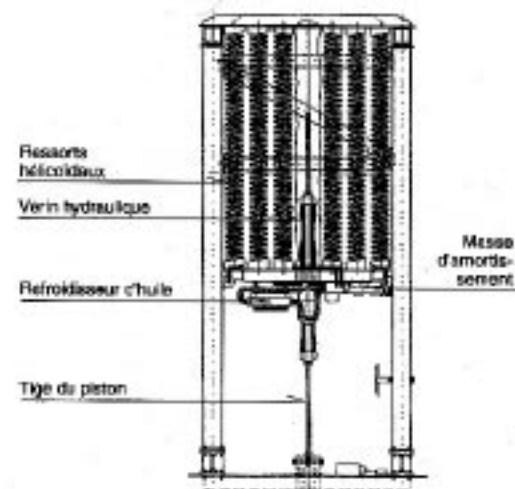
billonnaires et ne sont pas compatibles avec les conditions de confort fixées pour le projet.

Pour contrecarrer cette situation, il a été décidé de placer des amortisseurs dans certaines travées d'accès. Ces amortisseurs sont placés par paire, au milieu des travées que l'analyse aérodynamique a montré être le mieux adaptées pour amortir ces vibrations. Les 2 premiers modes de vibration sont amortis sur les travées coté Sprogø et les 4 premiers modes sont amortis sur les travées coté Halskov. Au total 32 amortisseurs sont placés dans le caisson.



Les amortisseurs sont des cages métalliques dont les colonnes verticales servent de guide à la masse amortissante. Les efforts sont transmis aux panneaux de fond du caisson qui sont renforcés à cet effet.

Les masses amortissantes consistent en des plaques d'acier de 6 à 8 tonnes selon le mode de vibration à amortir. Leur mouvement est limité à 0,8 m. Ces plaques sont supportées par des ressorts hélicoïdaux (22 à 55 selon la fréquence de la vibration à amortir). Un amortisseur hydraulique à double effet assure l'absorption de l'énergie, l'huile échauffée étant ensuite réfrigérée.



Le bon fonctionnement des amortisseurs est enregistré à distance en permanence. Les paramètres enregistrés sont : amplitude des vibrations, pression et température de l'huile

qui permettent de surveiller le nombre et la distribution des vibrations dans un intervalle de temps déterminé, la fréquence propre des amortisseurs et l'amortissement lui-même.

Ce dispositif a relevé le seuil de la vitesse critique à 25 m/s. Le confort est amélioré et le nombre de jours de fermeture du pont en cas de tempête est réduit à 1 jour tous les 3 ou 4 ans au lieu de 3 à 4 jours par an.

Montage des câbles porteurs

Cette activité attire toujours beaucoup l'attention pour différentes raisons. D'abord, parce que c'est à ce moment là que l'on commence à voir la vraie dimension de l'ouvrage. Ensuite parce que c'est une opération qui est critique dans le temps et qui demande une longue et délicate période de préparation. Des choix irréversibles de méthodes doivent être faits bien avant de fabriquer les équipements spécifiques nécessaires. Ces choix seront décisifs pour la maîtrise des coûts et du planning de l'opération. Ces travaux ont commencé en juillet 1996 et seront achevés en décembre si tout se passe bien.

Les câbles porteurs sont en fils parallèles de 5,38 mm, 1 570 N/mm² minimum de résistance à la rupture, étirés à froid, galvanisés à chaud (40 microns). Chaque câble porteur est constitué de 37 câbles élémentaires de 504 fils (20000 t d'acier). Il y a donc 18648 fils dans chaque câble porteur. La longueur totale de fil à mettre en place pour 2 câbles porteur est de 112500 km, soit environ 3 fois le tour de la terre à l'équateur. L'importance de ces chiffres montre qu'il est essentiel de faire des choix corrects au cours de la préparation de l'opération de câblage.

La méthode adoptée est appelée "Low Tension Aerial Spinning". C'est une variante de la méthode traditionnelle "Aerial Spinning" où chaque fil est dévidé à une tension d'environ 50 % de sa tension définitive, puis ajusté immédiatement après à la tension définitive correspondante à son poids propre sous la flèche donnée. Dans la méthode "Low Tension", une partie du poids propre des fils (ici 20 %) est supportée par la passerelle volante "Catwalk", au cours du montage d'un câble élémentaire (504 fils). Des câbles supplémentaires dits "Câble de contrôle de flèche" sont tendus progressivement au cours du montage des câbles élémentaires pour reprendre les 20 % de poids et contenir la déformation de la passerelle volante sous l'augmentation pro-

Répartition dans les travées d'accès des amortisseurs de vibrations verticales (TMD)

Élévation d'un amortisseur

Montage des fils du premier câble élémentaire dans la selle d'appui sur massif d'ancrage. La navette avec ses 4 boucles passe la selle d'appui.

gressive de charge due aux fils déjà mis en place, dans des limites données et éviter une trop grande dispersion de la tension des fils dans les câbles élémentaires. Quand un câble élémentaire est achevé, il est ajusté à la flèche définitive du câble libre sous son poids propre, sans support. La passerelle volante est ainsi déchargée, les câbles de contrôle de flèche sont détendus, et l'opération peut recommencer pour le ou les câbles élémentaires suivants. Quand 7 câbles élémentaires sont montés et ajustés, les charges dues aux câbles élémentaires suivants sont supportées directement par les câbles déjà montés, et les câbles de contrôle de flèche sont abandonnés.

Les avantages de cette méthode, mise au point par les Japonais, comparés à la méthode traditionnelle sont les suivants : ajustement des câbles élémentaires (504 fils) ou (1008 fils), en une opération au lieu d'un ajustement successif, fil par fil au cours du montage, donc gain de temps appréciable, moindre dispersion dans la tension individuelle des fils d'un câble élémentaire, donc meilleure qualité du câblage, moindre sensibilité au vent, meilleur contrôle de la géométrie définitive du câblage.

La méthode est la suivante. Une navette tire 4 boucles, donc 8 fils du massif d'ancrage Halsskov où toutes les installations de déroulage sont concentrées, vers Sprogø et met en place immédiatement 4 de ces fils dans le point d'ancrage, dans les selles d'appuis et dans les cadres sur la passerelle volante. Au retour cette même navette soulèvera les 4 autres fils mis en attente sur le côté des cadres et les mettra en place comme les premiers. La tension constante des fils est contrôlée par un système de contrepoids. Il y a un téléphérique sur chaque câble et 2 navettes sur chaque téléphérique. Elles voyagent toujours l'une vers l'autre et se croisent donc au milieu de la travée centrale. Il y a en outre 8 équipements de déroulement des fils. Ceci permet les combinaisons suivantes :

- *Travail sur un câble porteur alternativement Nord et Sud. A chaque aller et retour des navettes, 16 fils seront mis en place sur un câble élémentaire ou 8 fils sur deux câbles élémentaires.*
- *Travail sur deux câbles porteurs en parallèle : 8 fils seront mis en place sur chaque câble élémentaire Nord et Sud.*

La première méthode a été retenue car elle permet une optimisation des séquences de tra-



vail - montage /ajustement des câbles élémentaires - alternativement d'un câble à l'autre.

Avant chaque ajustement, les câbles élémentaires sont maintenus par des bandes provisoires et l'opération peut continuer sur les câbles suivants. L'ajustement des câbles élémentaires se fait par déplacement des points d'ancrage et glissement des câbles élémentaires sur les selles d'appuis au sommet des pylônes ou sur les massifs d'ancrage.

Suspentes

Les suspentes sont des câbles clos à fils galvanisés à chaud avec les mêmes caractéristiques mécaniques que les fils des câbles porteurs. La protection finale des suspentes contre la corrosion est assurée par une gaine de 7 mm, extrudée, en polyéthylène haute densité à 2 % de carbone minimum (résistance aux UV). Il y a 3 types de suspentes de diamètre respectivement égal à 65, 75, 98 mm, non compris la gaine.

Il y a donc 3 niveaux de protection contre la corrosion. La galvanisation des fils, les câbles clos avec 3 couches de fils profilés en Z, et enfin la gaine étanche en polyéthylène haute densité. Un culottage en zinc fondu était techniquement difficile en raison de la gaine. La solution adoptée est un culottage à froid, en résine de polyester renforcée par de la silice

en poudre. L'étanchéité des culots contre les infiltrations d'eau au sommet des suspentes est assurée par un mastic protégé lui-même par une feuille d'aluminium. Les essais à la rupture et à la fatigue ont montré que cette solution était satisfaisante.

Le point d'ancrage inférieur des suspentes est à l'intérieur du caisson et les mêmes soucis d'étanchéité ont guidé les solutions adoptées pour la pénétration de ces suspentes dans le tablier.

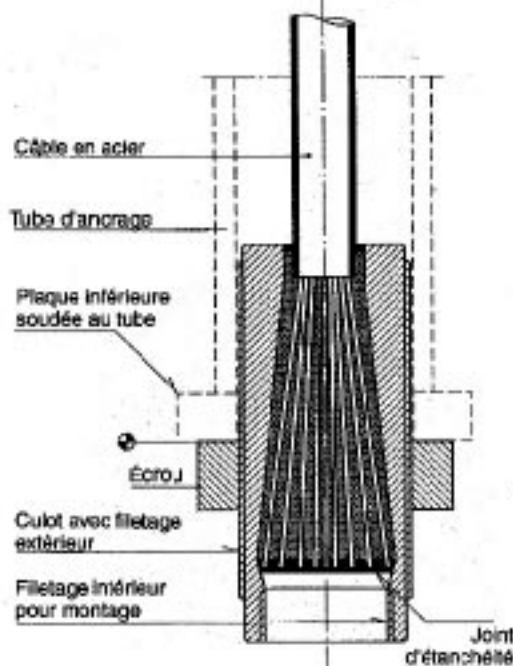
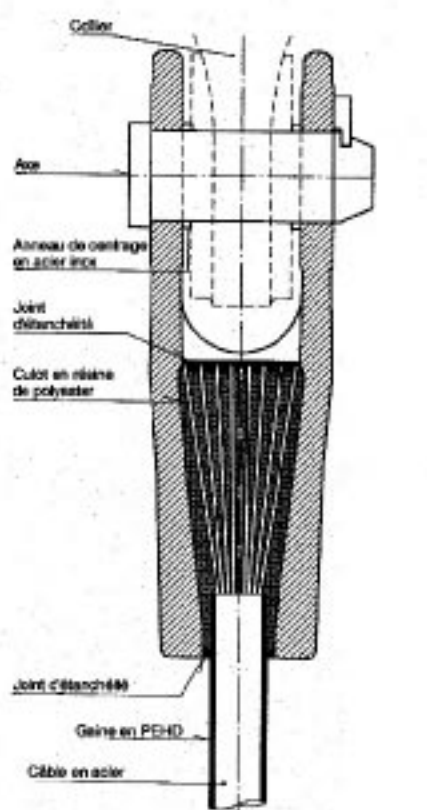
Amortisseurs hydrauliques

Un pont suspendu est une structure flexible et les mouvements aux joints de dilatation dus aux charges routières ou au vent sont nombreux, rapides et généralement de faible amplitude. Par contre les mouvements dus aux variations de température sont lents, peu nombreux et de grande amplitude. L'expérience a montré que l'usure des joints de dilatation était principalement due aux mouvements rapides et de faible amplitude. Il est donc avantageux de les éliminer.

Des amortisseurs hydrauliques de 5 MN de capacité, deux à chaque massif d'ancrage sont placés entre le tablier du pont suspendu et les massifs d'ancrage. Ces amortisseurs sont couplés hydrauliquement en parallèle et leur action est contrôlée par une soupape de sécurité, calibrée pour empêcher les mouvements rapides du tablier.

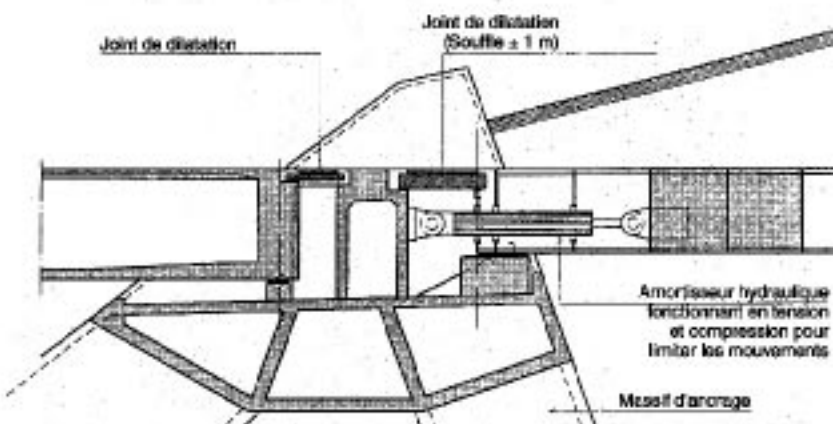
Par contre les mouvements lents ($V < 0,1$ mm/s) sont libres, sans contrainte. Le couplage hydraulique est tel que les rotations horizontales du tablier aux massifs d'ancrage se font sans contrainte.

Le poste de surveillance du pont enregistrera les mouvements du tablier en nombre et en amplitude, ainsi que la pression d'huile dans le système hydraulique.



Ancrages supérieur et inférieur des suspentes

Amortisseur hydraulique entre le tablier et le massif d'ancrage



CONCLUSIONS

Acrobatie aérienne
à 60 m de hauteur
avec 900 t au
crochet

Le projet du Grand Belt au Danemark est un projet remarquable à beaucoup de points de vue. C'est un projet où les expériences acquises en 25 ans sur d'autres ouvrages intéressants, mais de moindre importance ont été appliquées à grande échelle. Cela a été possible entre autre grâce à une continuité dans la philosophie des projets étudiés au cours de cette période. Ce sont pratiquement les mêmes sociétés ou groupes de personnes qui ont participé aux études et à la construction de tous les ponts du Danemark au cours de ces 25 années, sans compter les participations à des projets prestigieux à l'étranger.

Les études ont été menées en prévision des besoins créés par une préfabrication intensive et aussi en tenant compte des problèmes d'entretien d'un ouvrage de cette importance.

Les ponts suspendus ne sont pas des constructions passives qui enjambent un obstacle, sans plus. Ce sont devenus de vraies machines complexes qu'il faut surveiller de près et en permanence. Tous les moyens modernes mettant en jeu la mécanique, l'hydraulique et l'électronique, sont utilisés pour assurer le bon fonctionnement des installations en vue du confort et de la sécurité des usagers.

F. ROUVILLAIN ■



État actuel des
travaux



Francis
ROUVILLAIN
VSc Technical Adviser
COWI Consulting
Engineers and
Planners AS
Tel : 00 45 45 97 22 11

Surveillance des ouvrages et des sites : Pont Neuf de Foix

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE

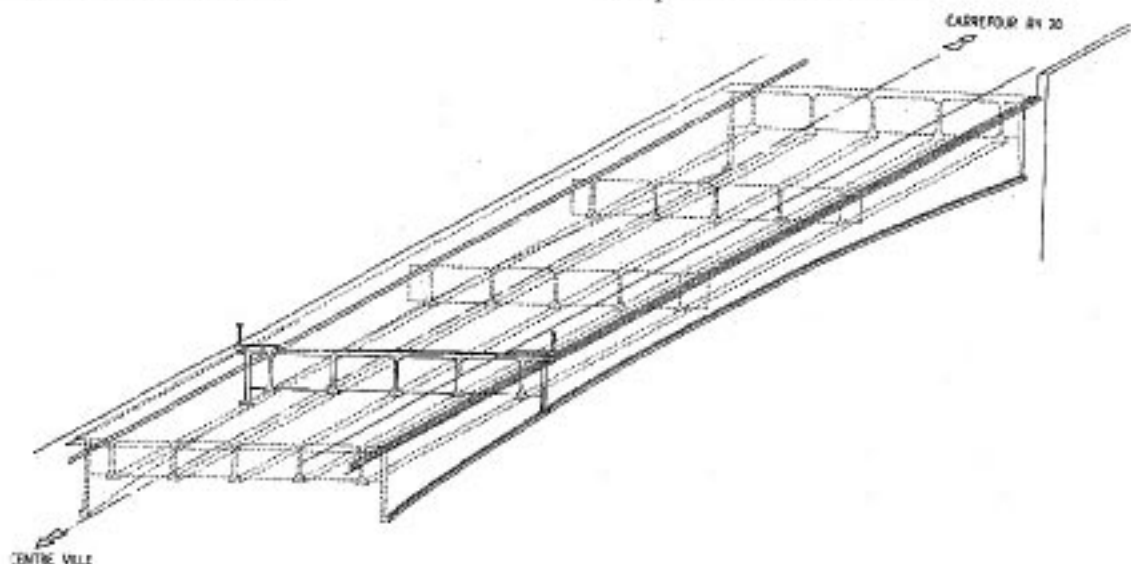
L'ouvrage date de 1963, il est situé sur la commune de Foix et traverse l'Ariège. La voie concernée est la R.D.117 qui supporte le trafic de la R.N.20, dans le sens Nord-Sud (17500 véhicules/jour en M.j.a. et le double en période estivale). Un deuxième ouvrage a été construit à proximité, les deux ouvrages fonctionnant en giratoire à l'intersection des deux voies.

Caractéristiques techniques

Il s'agit d'un ouvrage biais de type VIPP constitué d'une travée isostatique avec appuis sur culées en béton armé.

Les problèmes soulevés par cet ouvrage concernent uniquement le tablier dont les caractéristiques sont les suivantes :

Présentation de l'ouvrage



- longueur : 36,80 m
- largeur utile : 15,60 m

■ Poutres :

- cinq poutres précontraintes par post-tension de 36,80 m de longueur entre axes des appuis ;
- entre axes des poutres : 3,12 m ;
- hauteur des poutres : 2,18 m ;
- précontrainte
 - procédé SEEE - CO2 (7 torons de 7 fils de 3,6 mm - 500 mm²)
 - FRG = 96 t ; F max sur l'ancrage = 82,2 t
 - 12 câbles par poutre : 5 sur la longueur de la poutre, 7 relevés sur l'extrados ;

■ Entretoises :

Cinq entretoises biaisées dont deux d'about avec 2 câbles de précontrainte chacune ;

■ Dalle :

- épaisseur : 0,16 m ;
- pas d'aciers passifs de continuité transversale ;
- précontrainte transversale espacée de 0,80 m.

■ Bandeaux :

L'ouvrage comporte deux bandeaux de hauteur variable (2,20 m à la clé et 3,71 m sur les appuis). Chacun comporte un câble de précontrainte relevé à 1,4 m des extrémités. Ces bandeaux sont reliés aux entretoises.

Problèmes posés

Les désordres externes constatés sont peu importants :

- fissuration longitudinale des talons ;

- présence de stalactites actives ;
- fissure sur trois des extrémités des bandeaux ;
- aucune fissuration caractéristique de flexion ou d'effort tranchant.

De nombreuses investigations et études ont été réalisées entre 1993 et 1995 à l'initiative du département ou de l'Etat qui souhaitait y faire passer le trafic de la R.N.20 :

- Contrôle gammagraphique (LRPC de Blois) :
 - injection des gaines très défectueuses, aucune présente un remplissage correct
 - manque total de coulis au niveau des ancrages.
- Reconnaissance endoscopique (LRPC de Toulouse) : deux séries ont été menées, la deuxième a permis de détecter un câble corrodé par piquage et un câble subissant une corrosion généralisée dans les parties relevées.
- Calcul de l'ouvrage effectué à deux reprises par Europe Etudes Gecti et essai de chargement ; le résultat de cette approche a conduit à une obligation de réduire la largeur pour ne permettre qu'une seule voie Poids Lourds.

Bilan et décisions

Le ferrailage passif de l'ouvrage est insuffisant, la précontrainte participe de façon importante à la reprise des efforts tranchants. Les câbles de précontrainte sont peu ou pas protégés, en particulier à proximité des ancrages. Ils sont atteints par l'oxydation qui conduit fatalement vers une évolution progressive de rupture. C'est donc un risque de rupture fragile aux efforts tranchants qui a été détecté. Il n'existe pas de possibilité économiquement satisfaisante de confortement de l'ouvrage, qui de ce fait est condamné et doit donc être remplacé à plus ou moins long terme.

L'Etat avait prévu, début 1995, de faire passer le trafic de la RN 20 sur l'ouvrage ; il convenait donc d'examiner les décisions à prendre sachant que la réalisation du giratoire avait été prévue pour améliorer la fluidité du trafic dans la traversée de Foix, dans l'attente de la réalisation de la déviation de Foix dont la mise en ser-

vice interviendra à l'an 2000. La question posée était donc de savoir s'il était possible ou non d'exploiter cet ouvrage et dans quelles conditions jusqu'à cette échéance. Un Comité Technique présidé par Monsieur Bois, IGOA a été institué pour donner un avis sur ce point.

La Division des Ouvrages d'Art du CETE du Sud-Ouest a été chargée des recalculs devant aider le Comité Technique à prendre les décisions adéquates. Ces calculs montrent qu'en exploitation à deux voies (largeur de chaussée de 8,00 m), l'ouvrage avec une précontrainte intègre reste réglementaire vis-à-vis des contraintes de cisaillement à l'ELS mais que l'insuffisance d'étriers passifs n'assure pas de comportement ductile de la structure en cas de rupture due à l'effort tranchant. De plus, dans cette configuration, la rupture d'un câble dans une poutre conduit à la ruine de celle-ci par effort tranchant. En exploitation à une voie centrée (largeur de chaussée de 4,90 m) l'ouvrage avec une précontrainte intègre est réglementaire vis-à-vis des contraintes de cisaillement à l'ELS mais la ductilité à rupture par effort tranchant n'est pas assurée par les étriers passifs. Cependant, dans cette configuration, les calculs montrent que la rupture d'un câble dans une poutre ne conduit qu'à un faible dépassement des limites réglementaires de cisaillement à l'ELS situé largement en deçà des critères de rupture.

La rupture de deux câbles situe le cisaillement entre la limite réglementaire et le critère de rupture et enfin la rupture de trois câbles peut faire atteindre le niveau de cisaillement de rupture. Le Comité a donc estimé que l'ouvrage pouvait être exploité avec une chaussée à 2 voies centrée sur le tablier sous réserve que soit mis en place un dispositif de surveillance permettant de détecter en temps réel la rupture des aciers de précontrainte en distinguant la rupture d'un fil seul de la rupture d'un toron. Il a demandé en plus que soit mis en place un dispositif d'alerte permettant de fermer l'ouvrage sans délais dans les situations suivantes :

- rupture d'un toron ;
- rupture d'un huitième fil à l'un des abouts de poutre.

CHOIX DES PARAMÈTRES A SURVEILLER ET MOYENS MIS EN ŒUVRE

Paramètres

La résistance à l'effort tranchant des poutres du pont de Foix est essentiellement assurée par les

câbles de précontrainte, la section dangereuse se situant à environ 3 m de la culée.

Il a donc été décidé d'utiliser un moyen de surveillance permettant de détecter toute rup-

ture de fil survenant dans la zone dangereuse pour pouvoir prendre, en temps utile, des mesures de fermeture de l'ouvrage à la circulation.

Moyens mis en œuvre

La détection des ruptures a été assurée par un système de surveillance acoustique mis au point au LCPC. Le principe est le suivant :

Toute rupture engendre à l'instant où elle se produit des ondes élastiques transitoires qui se propagent dans les câbles et le béton. Des capteurs répartis sur l'âme des poutres détectent ces ondes et l'analyse des signaux qu'ils délivrent permet de localiser l'origine des ondes et d'estimer approximativement l'énergie libérée par une mesure d'amplitude.

L'appareillage installé comporte :

- une armoire de gestion qui enregistre et analyse les signaux des capteurs. Elle teste en outre automatiquement leur bon fonctionnement toutes les 24 heures ;
- une série de capteurs répartis aux endroits critiques sur l'ouvrage à surveiller.

Pour chaque onde détectée, les mesures suivantes sont automatiquement effectuées :

- Différences de temps d'arrivée des ondes aux différents capteurs ;
- Amplitude crête de la première alternance ;
- Amplitude maximum du signal.

La valeur de ces critères peut varier d'un ouvrage à l'autre suivant les conditions de propagation des ondes. Pour le Pont de Foix, ils ont été définis ainsi :

- Vitesse de propagation comprise entre 3600 et 6000 m/s ;
- Au moins trois capteurs consécutifs atteints ;
- Amplitude crête du signal supérieure à 8 g

Installations sur le Pont Neuf

Les abouts de chacune des 5 poutres ont été équipés de 3 capteurs fixés en ligne sur les âmes des poutres tous les 4 m. L'ensemble de l'ouvrage est donc surveillé en permanence par 30 capteurs reliés à une armoire de gestion située près de la culée rive gauche.

Autre équipement technique

L'ouvrage a également été équipé d'un dispositif permettant de surveiller l'évolution des fissures des deux bandeaux. Ce dispositif ne rentre pas dans l'organisation technique de l'alerte, nous n'en parlerons donc pas ici.

ORGANISATION DE L'ALERTE ET INTERVENTION

La surveillance du Pont Neuf de Foix et le dispositif d'alerte et d'intervention ont fait l'objet de l'élaboration d'un plan de surveillance qui a été approuvé par un arrêté préfectoral le 20 mai 1995.

Le plan d'alerte est schématisé à la page suivante :

Le dispositif d'alerte est adapté aux contraintes imposées pour assurer la sécurité de la circulation sur le pont à savoir pouvoir fermer le pont dans les plus brefs délais suite à la rupture d'un toron ou à la rupture d'un huitième fil à l'about d'une poutre. Ceci impose un dispositif de surveillance permanent et fiable et une capacité à décider et à intervenir très rapidement d'où la mobilisation de plusieurs partenaires dans l'organisation de la surveillance et de l'alerte. Les principaux partenaires sont les suivants :

▲ La Direction Départementale de l'Équipement de l'Ariège,

responsable du dispositif de surveillance et d'alerte. Dans le cadre de la surveillance et de l'alerte son rôle est le suivant :

- Le cadre de permanence de la D.D.E. doit pouvoir être joint 24 h/24 pour prendre connaissance des informations délivrées par le micro implanté au Centre Opérationnel du Service Départemental d'Incendie et de Secours (C.O.D.I.S.) et prendre la décision de fermeture du pont si nécessaire ;
- La Subdivision de Foix est mobilisée si nécessaire pour gérer les problèmes de circulation et de trafic.

▲ Le Service Départemental d'Incendie et de Secours (S.D.I.S.)

Un micro relié à l'armoire technique du Pont Neuf est implanté au Centre Opérationnel permanent du S.D.I.S. Le micro déclenche l'alerte et fournit les informations suivantes :

- Localisation de la rupture ;
- Amplitude acoustique permettant de déterminer s'il s'agit d'une rupture de fil ou de toron ;
- Vitesse de propagation de l'onde.

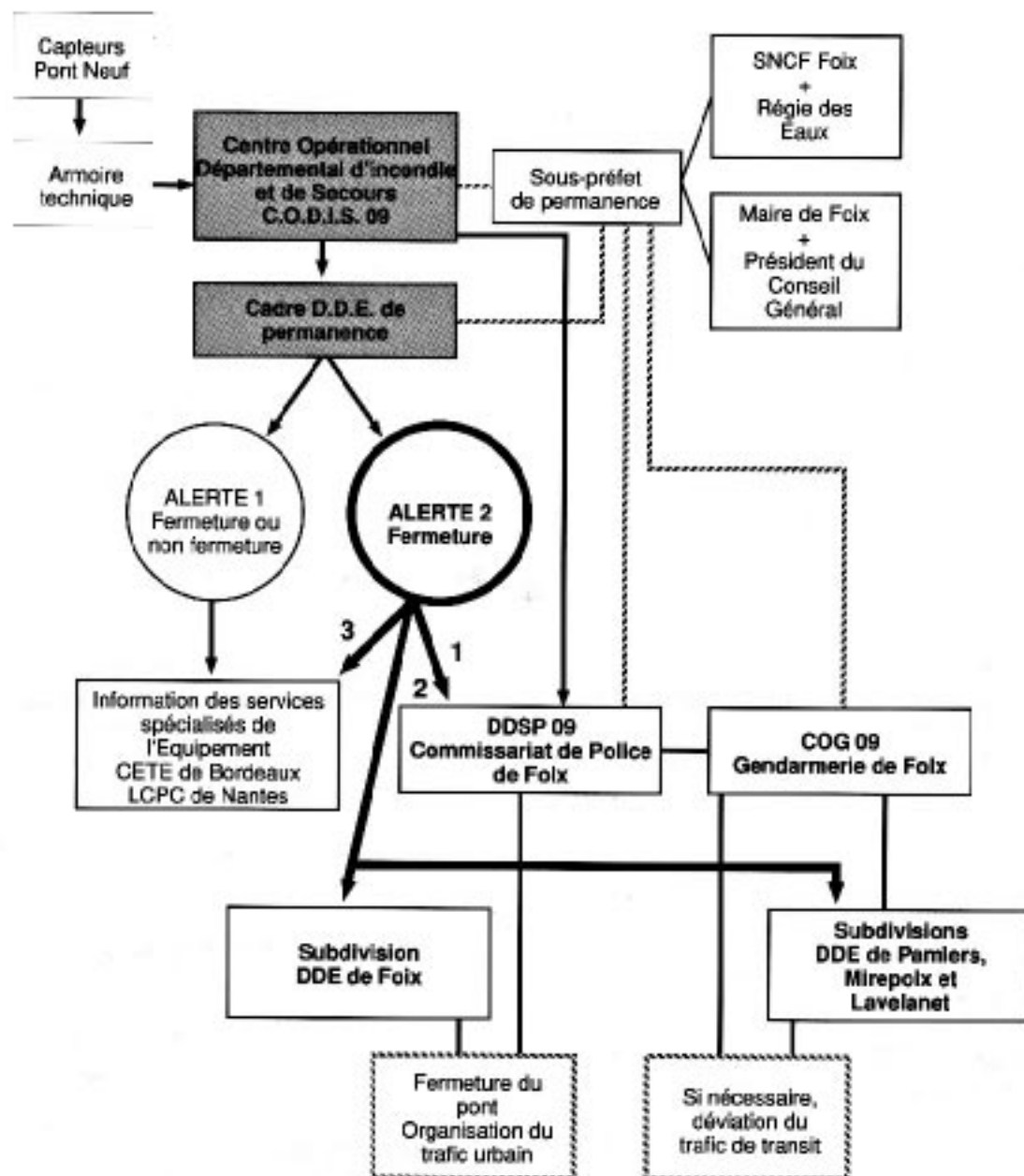
Le S.D.I.S. assure l'interface entre l'armoire technique du pont Neuf qui enregistre les événements et le cadre de la D.D.E. qui prend les

décisions nécessaires. En cas d'absence de réponse du cadre de permanence de la D.D.E. dans un délai de 10 minutes, la permanence du S.D.I.S. informe la permanence préfectorale.

▲ **Le Commissariat de Police de Foix**

Il dispose lui aussi d'un micro identique à celui du S.D.I.S., en secours. Il reçoit les mêmes informations. A la demande du cadre de permanence de la D.D.E. il est chargé

d'assurer, si nécessaire, la fermeture du pont sans délai, ce qui peut être fait dans les cinq minutes qui suivent l'appel.

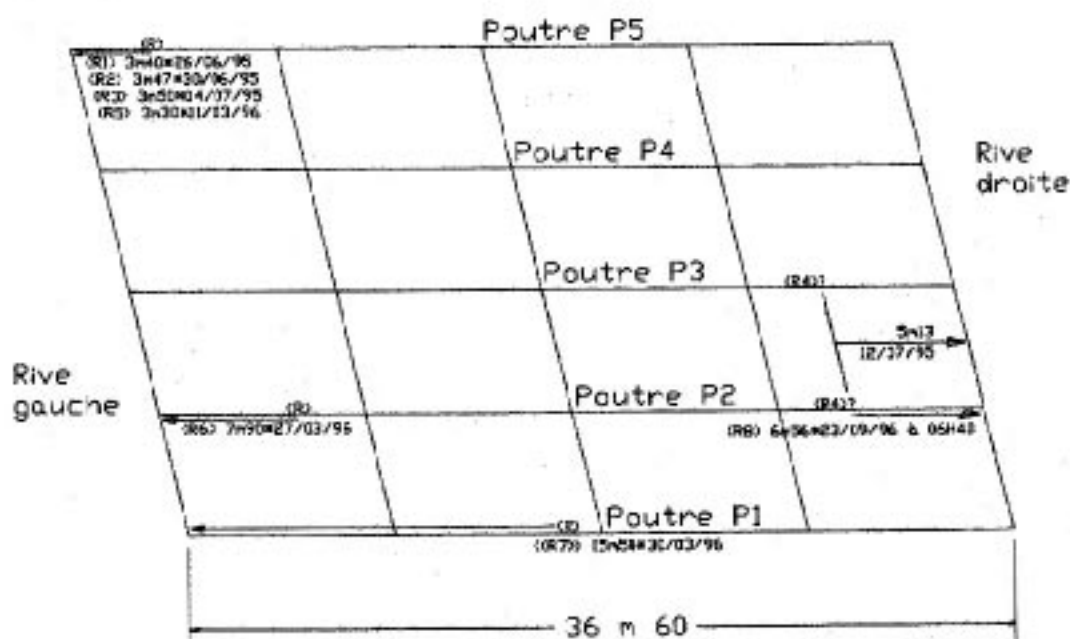


BILAN DE LA SURVEILLANCE

Le dispositif de surveillance et d'alerte est opérationnel depuis le 20 mai 1995. Depuis cette date huit ruptures de fil ont été enregistrées.

Dans un premier temps le seuil d'alerte a été situé relativement haut pour caler le dispositif. Les trois premières ruptures ont été détectées par le L.C.P.C. de Nantes. Les dernières ruptu-

Pont Neuf de Foix
Surveillance
acoustique
Bilan des ruptures
de fils en novembre
96



res enregistrées dans les abouts de poutre ont montré un bon fonctionnement du dispositif en dépit des heures de ces alertes en milieu de

nuit (23h47 et 1h47). Enfin on peut noter que depuis un an quatre ruptures de fil ont déjà été enregistrées au même about de poutre.

PROBLÈMES SOULEVÉS

Les principaux problèmes que pose ce système de surveillance sont les suivants :

- *Contraintes fortes pour le cadre de permanence de la D.D.E. qui doit être en mesure de réagir 24 heures/24. Par contre, l'utilisation d'un service d'urgence comme le S.D.I.S. est un gage de fiabilité du dispositif.*
- *Fiabilité technique : Les plus gros problèmes qui se sont posés durant la première année sont d'ordre technique notamment durant les quatre premiers mois :*
 - *Problèmes de communication,*
 - *Panne de capteur.*

— *Alimentation électrique coupée.*

Il a donc été mis en place un ensemble de dispositifs de sécurité permettant de pallier ces différentes pannes :

- *Doublement de la ligne de communication par implantation d'un second micro au Commissariat de Police,*
- *Mise en place d'un onduleur et système d'alerte téléphonique en cas de coupure d'électricité,*
- *Recablage des capteurs du pont pour permettre d'isoler un about de poutre lorsqu'un capteur est en panne.*

CONCLUSIONS

Le dispositif de surveillance et d'alerte mis en place au Pont Neuf de Foix est original et unique bien qu'utilisant une technique acoustique déjà éprouvée dans d'autres cadres de surveillance d'ouvrages d'art.

Le fonctionnement technique est relativement complexe et a nécessité une période de rodage avant d'atteindre une fiabilité qui paraît désormais satisfaisante. C'est la D.D.E. qui assure la maintenance générale. Des essais

réguliers sont effectués au moins une fois par mois pour tester le matériel.

En terme d'organisation, la contrainte est relativement forte. Le cadre de permanence de la D.D.E. doit être en mesure de prendre une décision de fermeture du pont 24 h/ 24 h, sa mobilisation doit être constante et ne pas s'éteindre dans le temps.

M. COURT - B. GRÈZES - P. LOSSET ■

Maurice COURT
Chargé de mission -
D.D.E. de l'Arège
Tel : 05 61 02 32 26

Bernard GRÈZES
I.R.T.P.E.
CETE SUD-OUEST
Chef de la Division
Ouvrages d'Art
Tél : 05 56 70 64 90

Patrick LOSSET
I.T.P.E. CETE SUD-OUEST
Division Ouvrages d'Art
Tél : 05 56 70 65 02

Concours national de conception d'ouvrages types en B.H.P.

Le contexte

Nous vous avons annoncé et détaillé, lors du numéro 19 de novembre 1994 de la présente revue, le lancement sous l'égide de la Direction des Routes d'un concours de conception de pont type en BHP. Le présent article a pour objet la présentation de la solution lauréate présentée par le groupement Dalla Vera - Bouygues - A. Spielmann - et des projets classés deuxième et troisième, respectivement présentés par GTM - SEEE - D. Ranjard et Campenon Bernard SGE - CBC - Freyssinet - JMI - Europe Etudes - A. Spielmann.

Rappelons qu'il s'agissait de proposer un concept structurel élaboré à l'aide d'un BHP (B60 mini, B80 maxi) pour des franchissements de type PS d'une route à 2x2 voies ou autoroute et son application à trois ponts de la rocade Est de Bourges.

La forme administrative retenue pour le DCE, mis au point par la direction départementale de l'Équipement du Cher avec l'aide du SETRA et du LCPC, était l'appel d'offres sur performances qui permet de déboucher sur un marché de travaux concernant les trois ponts précités.

Le jury s'est réuni le 20 décembre 1995 pour analyser les dossiers des trois lauréats retenus pour la deuxième phase et le directeur départemental de l'Équipement du Cher a choisi l'attributaire en confirmant les propositions du jury.

Au delà des résultats et des concepts de structures présentés ci-après, il convient de retenir la grande diversité et la grande richesse des dossiers présentés. Certains ont été écartés, à regret, compte tenu du contexte spécifique de ce concours, et les membres du jury ont souhaité pouvoir retrouver certains projets dans un éventuel autre cadre compte tenu de leur intérêt technique.

A noter également que la quasi totalité des groupements nous ont témoigné le plaisir éprouvé par leurs équipes à participer à cet

appel d'offres qui permettait aux imaginations de s'exprimer sans trop de contraintes.

Il est prévu, à l'issue de ce chantier et d'adaptations éventuelles, de mettre au point un dossier d'ouvrage type PS-BHP permettant la généralisation de ce type de structure.

Un article ultérieur vous informera des principaux enseignements tirés du chantier qui a débuté en octobre 1996.

Le cahier des charges

■ Caractéristiques fonctionnelles

- ouvrage courant de type passage supérieur (franchissement d'une autoroute à 2x2 voies), pile centrale autorisée,
- travée centrale de 15 à 30 m,
- biais de 50 à 100 gr,
- largeur utile de 6 à 16 m,
- chaussée rétablie : deux voies de circulation bordées de trottoirs ou de BAU et équipées de barrières de sécurité,
- épaisseur maxi du tablier : 1 m,
- charges civiles réglementaires et char de 120 t,
- adaptable à tous types de fondations.

■ Matériaux

- tablier et appuis en BHP (Rc 28 comprise entre 60 et 80 Mpa),
- aciers Fe E500.

■ Règles de calcul

- règlements en vigueur dont BAEL et BPEL avec règles spécifiques retrait-fluage pour les BHP (conformes au futur règlement B80 : Cf bulletin spécial n° XIX du LCPC)
- fissuration préjudiciable
- classe III du BPEL

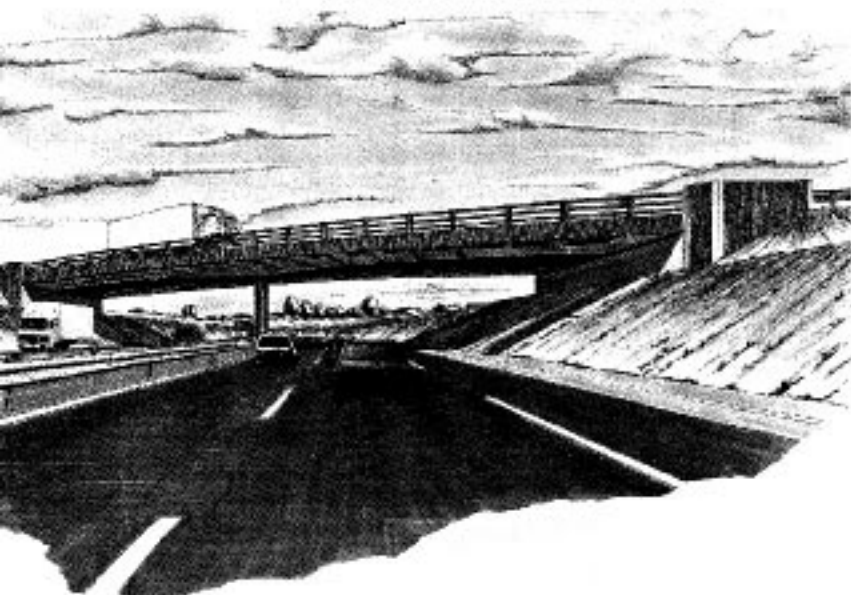
■ Critères de jugement

- valeur technique du dossier
- valorisation innovante des BHP
- prix
- méthode et moyens de construction et de maintenance
- aspect architectural

La solution lauréate du groupement DALLA VERA-BOUYGUES

■ Principes généraux

C'est le groupement Dalla Vera (mandataire) - Bouygues associé au bureau d'études Quille et au cabinet d'architectes A. Spielmann qui a été déclaré lauréat de ce concours.



Projet lauréat du groupement Dalla Vera-Bouygues

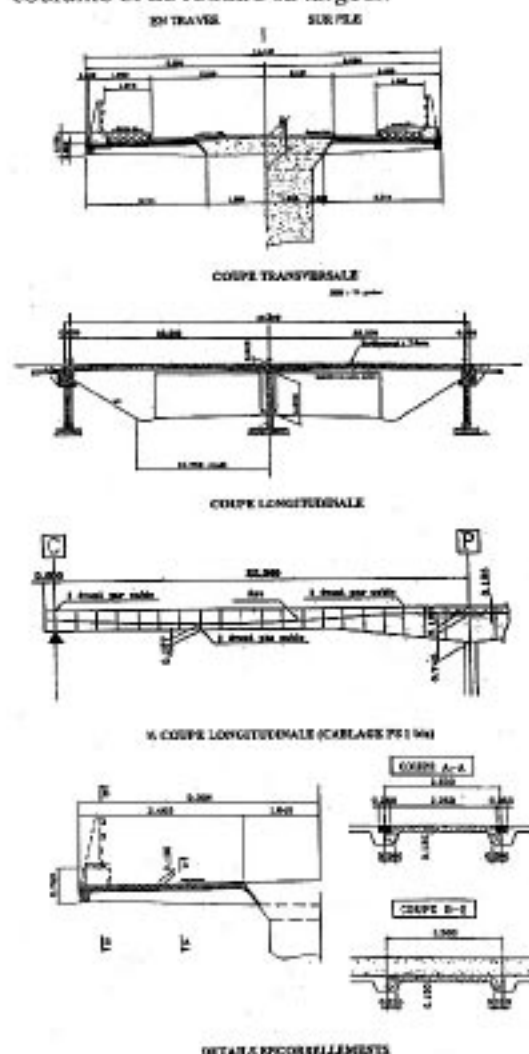
Les buts atteints, conformes à l'esprit du concours, sont de plusieurs types :

- conception créative et innovante d'un nouveau type d'ouvrage courant en BHP, pour un coût de construction légèrement inférieur aux solutions traditionnelles.
- structure optimisée grâce aux résistances mécaniques élevées du B.H.P.
- formes simples et sections particulièrement réduites, d'où allègement des pièces.
- alliance de méthodes traditionnelle et industrielle (nervure simple et massive coulée en place, encorbellements complexes et fins préfabriqués).
- rationalisation des méthodes et réduction de délais de construction.
- maintenance réduite (durabilité du matériau et structure simple).

■ Description d'un ouvrage type

Le tablier est composé d'une nervure principale épaisse au droit des appuis à l'aide de goussets standardisés permettent de diffuser les sollicitations importantes régnant dans la nervure.

L'utilisation d'un B80 permet de limiter à 54 cm l'épaisseur de cette nervure en section courante et de réduire sa largeur.



Les hourdis d'encorbellement ou de liaison entre les nervures sont préfabriqués en B 80 de façon à les alléger au maximum. Leur dimensionnement est adapté au transport routier (largeur 2,50 m), aux moyens ordinaires de levage et au calpinage des équipements de sécurité. Ces hourdis de 13 cm d'épaisseur sont rigidifiés :

- transversalement, par de petites nervures positionnées au droit des clavages et dans l'axe des poteaux de barrière de sécurité,
- longitudinalement, par la longrine d'ancrage de la barrière et par l'encastrement sur la nervure principale.

Le tablier est précontraint longitudinalement avec des câbles filants de précontrainte classique : 12, 13 ou 19 torons de type T 15.7 1860 TBR.

Aux extrémités du tablier sont coulées en place des entretoises assurant la diffusion des efforts de précontrainte. L'utilisation des Bétons à Hautes Performances imposée également pour les appuis, par le règlement du concours, permet d'envisager l'encastrement des tabliers sur les piles qui admettent tout type de fondations.

Les culées sont classiques, en tête de remblais. Le tablier repose sur les culées par l'intermédiaire d'appareils d'appuis néoprène.

Les dessins présentés ci-contre concernent l'application de ces principes généraux à l'un des ouvrages de la rocade de Bourges. La méthodologie générale du calcul comporte des spécificités concernant :

- la flexion transversale,
- la jonction boudins préfabriqués et nervure coulée en place. Analyse par un calcul aux éléments finis,
- la jonction longitudinale des éléments de boudins entre eux.

Des études particulières ont été menées pour adapter la solution type dans le cas d'un non-encastrement sur pile, et dans celui de la mise en œuvre de précontrainte transversale pour un maître d'œuvre exigeant un calcul en classe II.

■ Mode constructif

L'ouvrage est conçu pour que les structures mises en place pour l'exécution restent simples, sécurisantes et accessibles par tout professionnel en ouvrage d'art, suivant une configuration chantier très classique.

La conception des hourdis préfabriqués permet de simplifier le coffrage de la nervure coulée en place, en supprimant les coffrages latéraux dans les zones d'épaisseur constante. Les éléments en console intègrent la corniche préfabriquée en béton architectonique.

La nervure centrale est coulée en place en une seule phase sur un cintre traditionnel ; les caissons préfabriqués sont clavetés en même temps. L'étalement sous la nervure est allégé par rapport à celui d'un PS usuel tandis que l'étalement sous caissons préfabriqués permet d'obtenir le réglage définitif de la rive de l'intrados. Suivant la configuration, il est pos-

sible d'intégrer tous les types de gabarits routiers.

■ Adaptabilité de la solution

Selon le domaine d'application, la solution présentée peut s'adapter à différents partis.

▲ Au niveau architectural :

La conception technique laisse une grande liberté d'évolution quant aux traitements des ouvrages.

Appuis centraux fichant l'ouvrage en terre, de forme libre (voile rectangulaire ou trapézoïdal, plein ou ajouré). Encastrement ou non sur pile.

La corniche intégrée au hourdis préfabriqué peut être adaptée selon les désirs de l'Architecte d'opération, de manière à obtenir l'esthétique souhaitée.

La sous-face des hourdis préfabriqués permet de proposer une surface "vivante" et évolutive offrant une multiplicité de dispositions architecturales (usage de bétons différenciés par exemple).

▲ Au niveau structurel :

Au-delà de la solution la plus courante à deux travées, le domaine d'emploi de la structure peut se décliner suivant plusieurs configurations de franchissement. Une travée, trois travées ou travées multiples si nécessaire, combinées au nombre de nervures pour gérer la largeur utile. Ainsi les études préliminaires ont permis le prédimensionnement des possibilités suivantes :

- une travée isostatique de 18 m,
- un portique de 22 m d'ouverture,
- un tablier à travées multiples de 15 m - 30 m et 15 m,
- et bien sûr la solution deux travées présentée ci-dessus.

Celles-ci se couplant avec :

- une nervure pour des largeurs comprises entre 8 et 14 m,
- deux nervures pour des largeurs comprises entre 14 et 18 m,
- trois nervures au delà de 21 m.

D'une manière générale, la solution peut répondre à l'augmentation des performances en matière de franchissement, tout en diminuant le poids propre du tablier.



Solution "GEMO"

La solution "GEMO" (G.T.M. - S.E.E.E. - D. RANJARD)

■ Description générale

La proposition classée en seconde position est celle du groupement GTM - SEEE Infra et D. Ranjard. Ce concept a été baptisé GEMO (génération de tabliers modulaires) et fait appel à la préfabrication et à la précontrainte extérieure.

Les éléments de base sont standardisés et seuls les clavages et les chevêtres sont coulés en place. Au-delà des objectifs propres du concours, décrits précédemment, les avantages de cette solution sont :

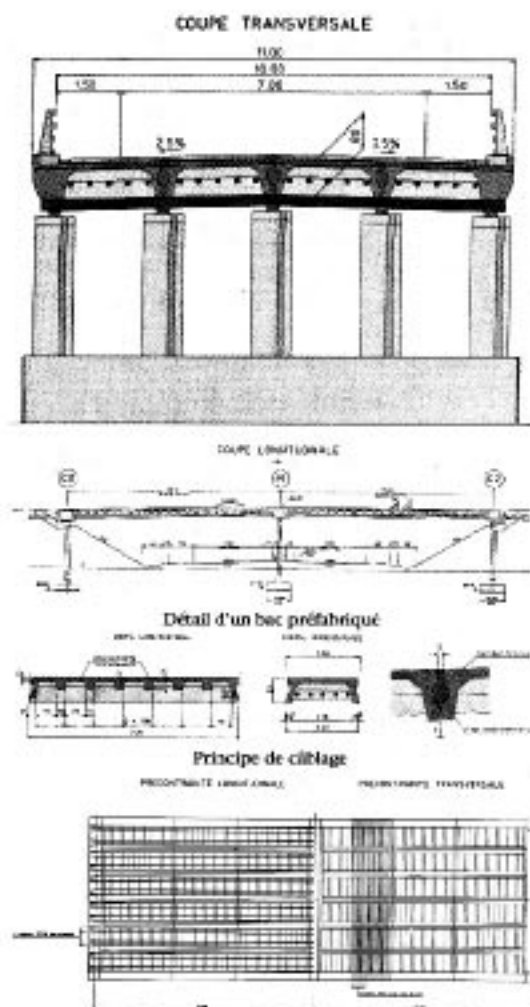
- l'abaissement du coût de réalisation grâce à une standardisation partielle,
- une importante réduction du temps de construction du tablier,
- la simplification des étalements,
- un haut niveau de finition avec l'emploi de moules de grande précision.

Conformément au règlement de l'appel d'offres, cette solution reste propriété intellectuelle de l'entreprise GTM.

■ Structure

▲ Les bacs préfabriqués

L'allègement de la masse du tablier (ramenée à l'unité de surface) obtenue grâce à la haute résistance du BHP permet la préfabrication. Pour faciliter l'industrialisation et le transport, le tablier est composé d'éléments modulables en béton armé. Après la préfabrication en usine ou sur site, les éléments sont assemblés



par précontrainte longitudinale et transversale après clavage des nœuds longitudinaux et transversaux. La conception des appuis, piles et culées, n'est que peu dépendante du procédé GEMO.

Pour optimiser l'épaisseur moyenne de béton et rentabiliser l'utilisation du BHP, la section choisie pour les éléments a une forme de bac.

Le bac élémentaire préfabriqué est constitué de 2 longerons reliés par une dalle nervurée de faible épaisseur. Les nervures, d'une largeur de 30 cm, d'une hauteur de 15 ou 20 cm, ont un espacement de 1 m. La dalle a une épaisseur de 15 cm. Les extrémités des bacs sont fermées par des tympans qui servent de déviateurs de la précontrainte. La longueur du bac peut varier en fonction du projet, de 5 à 12 m, par pas de 1 m (distance entre 2 nervures).

Les bacs de rives font l'objet d'un traitement spécial pour le longeron latéral qui s'adapte en forme et largeur aux spécificités de l'ouvrage. Ce longeron, plus massif, est renforcé pour résister au choc de camion. Le nombre de bacs constituant le tablier est fon-

tion des conditions particulières de chaque projet. Ils sont posés sur des tours d'étalement et ajustés pour régler les profils en long et en travers en jouant sur l'ouverture des joints. Ces derniers sont réalisés par coulage d'un BHP puis précontraints longitudinalement et transversalement sans continuité d'armatures passives.

▲ La précontrainte

La précontrainte longitudinale est dimensionnée pour que les joints restent comprimés sous les combinaisons rares réglementaires.

Les déviations des câbles sont réalisées en travée par un système de tubes en acier fixés sous les tympans d'extrémité des bacs. Sur appui intermédiaire, les déviations sont assurées par des tubes métalliques fixés dans le béton coulé en place. Le nombre de câbles par bac varie suivant la portée et la largeur du tablier.

La précontrainte est dimensionnée pour reprendre les efforts de flexion transversale en tenant compte des coefficients de répartition transversale. Celle-ci assure la continuité des bacs dans le sens transversal. Les câbles sont rectilignes et placés dans la dalle de 15 cm.

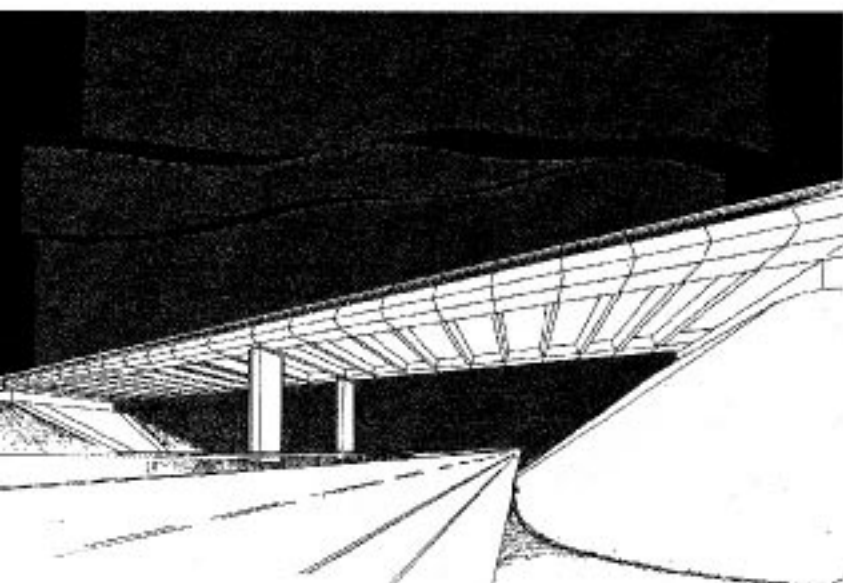
Le nombre de câbles estimé dans les prédimensionnements est de 1 toron tous les 25 cm. Les câbles sont perpendiculaires à l'axe longitudinal de l'ouvrage, quelles que

soient les caractéristiques géométriques de l'ouvrage (droit ou biais). Le pas d'implantation des câbles reste constant, la modulation de l'effort de précontrainte étant obtenue par variation du nombre de câbles mis en place.

▲ Réalisation

La mise en œuvre se déroule comme suit :

- *Préfabrication des éléments foraine ou en usine et transport sur site.*
- *Réalisation des appuis coulés en place ou en partie préfabriqués (la partie inférieure des chevêtres sur piles peut être préfabriquée pour simplifier la pose des bacs et le coffrage de cet élément).*
- *Mise en place des tours d'étalement disposées aux extrémités des différents éléments préfabriqués.*
- *Pose des éléments préfabriqués au moyen d'engins de levage appropriés sur les tours.*
- *Pose des coffrages des chevêtres et mise en place de leurs armatures passives.*
- *Ajustement des éléments pour assurer correctement les profils en travers et profils en long.*
- *Réalisation des joints de clavage entre éléments par coulage de béton BHP.*
- *Bétonnage de la partie supérieure des chevêtres sur appuis.*
- *Mise en précontrainte transversale et longitudinale.*
- *Enlèvement des tours d'étalement.*
- *Pose des superstructures.*



Solution "SPIEL PONT"

**La solution "SPIEL PONT"
(CAMPENON BERNARD SGE,
CBC, FREYSSINET, EEG, JMI,
A. SPIELMANN)**

■ **Lignes directrices de la conception**

La proposition classée en troisième position est celle du groupement Campenon Bernard SGE, Cochery Bourdin Chaussé, Freyssinet, Europe Etudes, J. Muller et A. Spielmann. Elle fait appel à un concept de standardisation poussée visant une quasi élimination des cintres traditionnels.

En effet, fort des expériences antérieures en matière de préfabrication des membres du groupement, il a été recherché une solution technique assurant :

- qualité architecturale,
- industrialisation maximale,
- facilité de fabrication,
- rapidité et simplicité de mise en œuvre,
- adaptabilité aux différents cas géométriques.

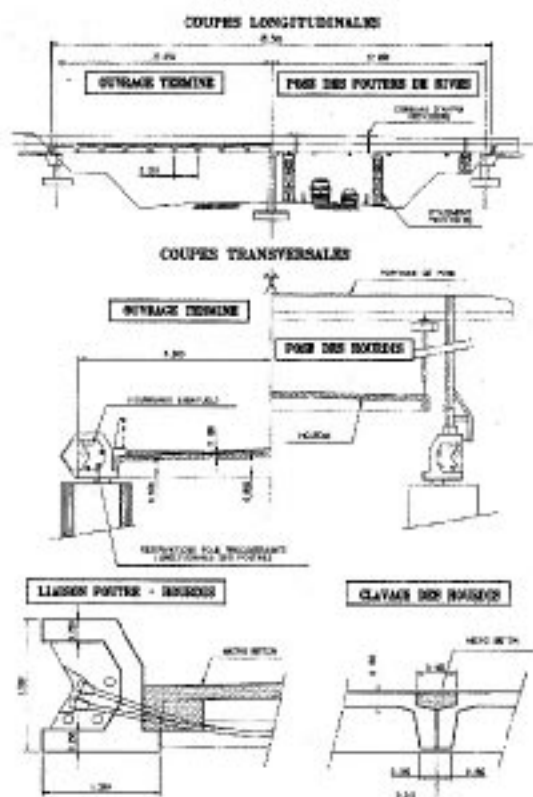
Les tabliers sont composés de deux poutres latérales constituant l'ossature porteuse et d'un hourdis intermédiaire nervuré. Ils sont entièrement préfabriqués et précontraints longitudinalement et transversalement.

L'utilisation de BHP 80 permet, grâce à ses performances mécaniques élevées une optimisation des sections.

La mise en œuvre est rapide et est réalisée sans interruption de circulation sur la voie franchie. Les poutres et les piles sont harmonisées (forme, couleur, aspect) donnant ainsi à l'ouvrage une unité et une spécificité en relation avec l'environnement. Telles sont les caractéristiques principales de cette proposition

baptisée "PONT JEU" ou "SPIEL PONT" qui a fait l'objet de dépôts de brevets.

■ **Structure**



Les poutres latérales porteuses en forme de "C" ouvert vers l'extérieur sont raidies par des entretoises, utilisées aussi comme déviateurs de la précontrainte longitudinale extérieure rectiligne (câbles 19T15 à 37T15) placée dans ces poutres. Cette forme en "C" assure un bon compromis entre la nécessité d'avoir une grande inertie de flexion et une faible inertie de torsion avec un centre de torsion placé à l'extérieur de la poutre côté hourdis. En fonction de la portée déterminante de l'ouvrage, trois hauteurs de poutres sont prévues 1,70 m, 1,50 m ou 1,30 m (la portée maximale est de 30 m).

Les hourdis sont des bacs de hauteur variable (0,70 m à 0,83 m) dont les nervures latérales ont une épaisseur qui varie de 0,18 m à 0,23 m et dont la table a une épaisseur constante de 0,16 m. La précontrainte transversale est assurée soit par des torons adhérents soit par post-tension (câbles 7T15 et 4T15) suivant la largeur de l'ouvrage.

■ **Préfabrication**

Tous les éléments sont préfabriqués en usine, ce qui permet d'assurer une très grande qualité de réalisation (structure et aspect).

Les différents éléments sont au gabarit routier (éléments de 12,50 m de long pour les poutres,

largeur 2,50 m pour les hourdis, poids maximum 30 t).

■ Mise en œuvre

Les éléments des poutres latérales sont posés sur des palées provisoires. Après matage des joints, la précontrainte est mise en œuvre et les palées provisoires évacuées.

Les éléments du hourdis sont ensuite mis en place sur les corbeaux d'appui de poutres latérales. Après coulage des joints, la mise en œuvre de la précontrainte transversale est réalisée. Pendant ces phases aucun appui au sol n'est nécessaire. La réalisation de l'ouvrage se fait sans coupure de circulation et dans un délai extrêmement court (2 semaines pour un ouvrage moyen).

■ Conclusion

La grande simplicité du procédé permet de réaliser un catalogue de pièces précalculées susceptibles de répondre à tous les cas de figures (biais, largeur, portée). La précon-

trainte longitudinale étant extérieure, elle peut être facilement chargée (2 câbles sur les 3 suffisent à porter l'ouvrage à vide).

Le creux du "C" permet de recevoir les réseaux des concessionnaires et reste accessible à tout moment. La forme et le matériau constitutifs de la corniche peuvent être adaptés aux exigences particulières du maître de l'ouvrage (béton, béton blanc, métal, corniche caniveau,...).

Si les objectifs de qualité architecturale, d'industrialisation, de rapidité et simplicité de fabrication et montage et d'adaptabilité sont bien remplis, le procédé permet en outre d'abaisser notablement le coût de la réalisation de tels ouvrages, surtout dans le cas de la construction d'un nombre important d'ouvrages en un seul lot.

D. BRAZILLIER - S. ROI
D. HAGOLLE - L. DEMILECAMP
J.-M. LASCAUX - Y. MOREAU ■

Didier BRAZILLIER
 I.D.T.P.E. - D.I.E. du Cher
 Directeur Technique du
 Projet National
 "BHP 2000"
 Tél : 02 48 55 46 47

Daniel HAGOLLE
 Directeur Travaux
 Entreprise DALLA VERA
 Tél : 02 38 78 10 19

Stéphane ROI
 Chef de Service
 Entreprise DALLA VERA
 Tél : 02 38 78 10 18

Louis DEMILECAMP
 Entreprise G.T.M.
 Direction technique T.P.
 Tél : 01 96 95 72 52

Jean-Michel LASCAUX
 Entreprise Campenon-
 Bernard SGE
 Direction Technique
 Tél : 01 47 16 47 00

Yves MOREAU
 Entreprise Campenon-
 Bernard SGE
 Direction Technique
 Tél : 01 47 16 47 00

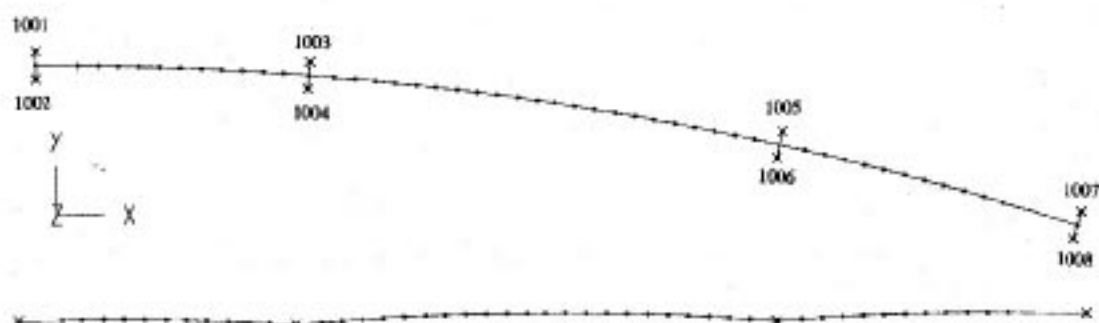
ANALYSE COMPARATIVE POUR UN OUVRAGE DE 2 X 22,50

	SoL. PSDP B35	SoL. Dalla Vera	SoL. GTM	SoL. Campenon Bernard
Epaisseur du tablier	1 m	0,54 à 1 m	0,80 m	Poutre latérale : 1,70 m Tablier : 0,84 m
Epaisseur équivalente	0,75 m	0,37 m	0,53 m	0,54 m
Volume de béton	390 m ³	188 m ³	270 m ³	289 m ³
Ferraillage passif	39 t	30 t	28 t	34 t
Précontrainte	17,4 t	9 t	23,2 t	20 t
Poids du tablier	975 t	470 t	675 t	723 t

Modélisation d'un pont construit par encorbellements

Une première fiche ST1 a été publiée dans le bulletin n° 15 du C.T.O.A. (juillet 93). Elle permettait de modéliser, de façon automatique, la géométrie d'un pont mono-caisson de hauteur variable construit par encorbel-

lements successifs. Cette deuxième fiche a pour objet la génération automatique du câblage en utilisant les instructions de pseudo-programmation de ST1.



Modèle de calcul : Vue de dessus et Vue suivant Y

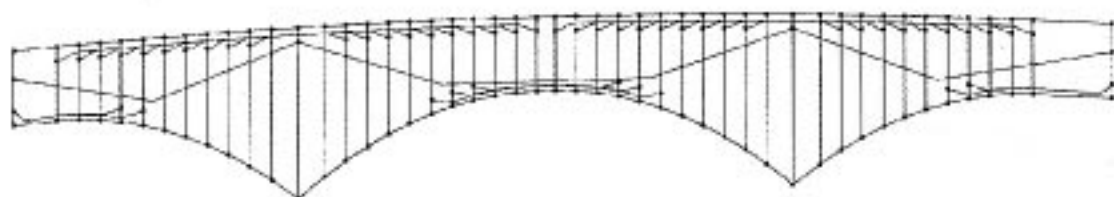


Schéma de câblage

La modélisation de la géométrie a été quelque peu modifiée. Les travées de rive peuvent avoir des portées différentes. Les goussets supérieurs (intérieurs et extérieurs) peuvent être différents et ceux d'intérieur peuvent être composés de deux éléments. L'épaisseur de l'âme est constante en partie courante, elle peut être différente sur pile.

Le câblage comprend trois familles : Câbles de fléau, câbles de continuité intérieurs dits "câbles éclisses" et câbles extérieurs. Les câbles de fléau sont au nombre de deux par voussoir. En ce qui concerne les câbles éclisses, l'utilisateur fixe leurs nombres et leurs points d'ancrages dans les travées de rive et les travées courantes. Le câblage extérieur est classique. Les câbles règnent sur deux travées, il est prévu deux câbles dans les travées de rive et quatre câbles dans les travées courantes. Les déviateurs sont au nombre de deux dans les travées courantes et un seul dans les

travées de rive. Leurs positions sont données par l'utilisateur.

La structure est modélisée par une poutre filaire spatiale décrivant la fibre moyenne du caisson. Au niveau de chaque appui on dispose une barre transversale rigide allant d'un appareil d'appui à l'autre (voir le modèle vue de dessus). Il est prévu également la génération automatique de l'extrados, de l'intrados et des joints de voussoirs permettant de visualiser et de dessiner la structure et de contrôler le tracé des câbles. Les barres correspondantes ne doivent pas être activées lors de l'exécution des chargements.

Le fichier de données n'est pas publié dans ce bulletin en raison de sa taille. Il sera envoyé aux personnes intéressées sur simple demande.

F. TAVAKOLI ■

Fereydoon
TAVAKOLI
Ingénieur - CETE de LYON
Division des Ouvrages
d'Art
Tél. 04 78 27 53 81

Mise en œuvre de la précontrainte : La Quête de P_0 !

Les progrès réalisés dans le domaine de la précontrainte par post-tension au cours des dix dernières années ont fait surgir de nouvelles interrogations sur les chantiers d'ouvrages d'art et plus particulièrement pour les ouvrages construits par encorbellements successifs.

Il est en effet de plus en plus fréquent, lorsque l'on travaille avec des caractéristiques fines telles que le rendement du couple vérin/ancrage¹ et le module des armatures livrées, d'obtenir l'allongement fatigué de $1.10 A_0$ bien avant d'avoir atteint la pression P_0 correspondant à la tension visée à l'ancrage.

Nous nous plaçons bien entendu dans un contexte où toutes les vérifications concernant les directives pressions/allongements², les frottements vérin/ancrage et le module d'acier ont été faites.

Cette constatation est à corréler avec des résultats de mesures de coefficient de transmission³ faisant apparaître des gains de 10 à 20 %. Nous avons bien affaire à une réduction des frottements (traduits par les fameux coefficients f et ϕ) imputable aux améliorations de la technique de la précontrainte : qualité des conduits et des gaines, positionnement des gaines, méthode d'enfilage, conditionnement des aciers, introduction de tubes PVC provisoires dans les gaines pour certaines entreprises.

Que faire dans ce cas ?

Le fascicule 65A impose l'arrêt de la mise en tension en considérant qu'il y a anomalie et renvoie au P.A.Q. de l'entreprise (rarement disert sur le sujet). Cette non-obtention de P_0 est en effet d'autant moins

acceptable que même la tension minimale peut ne pas être atteinte malgré des frottements plus faibles.

Il s'agit alors de comparer le coefficient de transmission théorique et le coefficient de transmission réel et de vérifier le module réel des armatures (pour l'instant considéré comme représentatif du câble) éventuellement au moyen d'essais mécaniques sur prélèvements.

Si l'arrêt à l'allongement limite $1.10 A_0$ apparaît effectivement imputable à la réduction des frottements (augmentation de la tension moyenne), il semble souhaitable de reprendre la mise en tension pour se rapprocher de P_0 .

Il n'est évidemment pas question de sortir du domaine élastique de l'armature et de risquer une rupture, comme une lecture rapide pourrait le suggérer. En fait, l'allongement excessif correspondrait bien à un allongement normal avec des coefficients f et ϕ plus réalistes.

Cette reprise doit naturellement être entérinée par le bureau d'études qui aura vérifié que l'effort de précontrainte est admissible dans chaque section.

Il est à noter que le fascicule 65A traite bien d'anomalie sur coefficient de transmission mais plutôt dans l'esprit d'une valeur mesurée inférieure à la valeur théorique.

Le dépassement de $1.10 A_0$ permettant d'atteindre l'état de précontrainte projeté à l'ancrage, dans le respect des autres sections, est donc possible et répond de surcroît au souci de pérennité des structures en préservant l'avenir.

M. HARRAN - G. LE MESTRE ■

REMARQUES CONCERNANT L'ARTICLE DE M. HARRAN ET G. LE MESTRE

L'article précédent ne doit pas être interprété comme une incitation à faire sauter une fois pour toutes le verrou réglementaire du $1.10 A_0$.

Lorsque c'est lui qui conditionne l'arrêt d'une mise en tension, il convient bien entendu de s'interroger sur les causes de l'excès d'allongement des armatures et de procéder aux investigations nécessaires en commençant par examiner les hypothèses prises en compte pour évaluer A_0 (valeurs de f et ϕ réglementaires sans doute pessimistes dans un certain nombre de cas, valeurs du module que, par excès de prudence, et en contradiction avec le règlement,

différents marchés imposent de caler sur celles mesurées directement sur le toron...).

Ce n'est qu'après avoir acquis la certitude que l'anomalie apparente résulte en fait d'une surestimation des frottements qu'il convient de s'affranchir de la borne $1.10 A_0$ en recentrant les allongements sur des valeurs plus réalistes A'_0 , les mises en tension ultérieures étant soumises au nouveau plafond $1.10 A'_0$.

Ainsi on ne fait pas disparaître le butoir, mais on le décale intelligemment.

R. CHAUSSIN ■

Michel HARRAN

Chargé d'Etudes Déten et
Ouvrages d'Art
L.R.P.C. TOULOUSE
Tél : 05 62 25 97 97

**Gilles
LE MESTRE**

L.T.P.E.
L.R.P.C. TOULOUSE
Tél : 05 62 25 97 97

**Robert
CHAUSSIN**

I.C.P.C. L.C.P.C.
Directeur Technique
Ouvrages d'Art
Tél : 01 40 43 50 91

1. Par exemple sur un banc d'étalonnage du type de celui du LRPC de Toulouse

2. Les directives ou consignes pressions/allongements, document de l'exécution quelque peu en marge des notes de calcul "classiques", doivent être analysés finement avant toute mise en tension.

3. Nous rappelons l'utilité pour un chantier de précontrainte de ces mesures au résultat indépendant des pressions et modules.