

## La passerelle des Anges

**Patrick Mazzacane**

Resp. Développement BFUP  
Bonna-Sabla

**Romain Ricciotti**

Ingénieur  
Lamoureux & Ricciotti Ingénierie

**François Teply**

Resp. Technique Régional  
Freyssinet France

### Résumé

Avec 67,5m de portée pour 1,80m de hauteur, soit un élancement de  $1/38^{\text{ème}}$ , la passerelle piétonne du pont du diable réalise une performance structurelle nouvelle. Cette réalisation permet également d'envisager des innovations importantes en termes d'impact environnemental, de procédés constructifs et d'économie de projet. Située à la sortie des gorges de l'Hérault, grand site classé au patrimoine de l'UNESCO, elle constitue un maillon essentiel du cheminement piétonnier aménagé. Cet ouvrage du XXI<sup>ème</sup> siècle trace un lien avec les trois ouvrages déjà existants du site, un pont voûte médiéval, un aqueduc en maçonnerie et un pont en béton armé du début XX<sup>ème</sup>.

La passerelle est constituée de 15 voussoirs préfabriqués en Ductal, posés sur cintre et assemblés par précontrainte. Après un rappel du contexte et des études, la présentation proposée illustre chaque phase de construction : fabrication du moule, coulage des voussoirs en usine, installation du cintre, mise en place et réglage des voussoirs, mise en œuvre de la précontrainte et des amortisseurs dynamiques accordés.

**Keywords:** BFUP, préfabrication, précontrainte, passerelle piétonne.

### 1. Présentation générale

La construction de la passerelle du Pont du Diable s'inscrit dans le projet d'aménagement du site classé du Pont du Diable, dans les gorges de l'Hérault. Il s'agit d'une opération « Grand Site ».

Les acteurs du projet sont les suivants :

- la maîtrise d'ouvrage, la communauté de communes de la Vallée de l'Hérault
- l'architecte, Rudy Ricciotti
- les paysagistes, APS
- le bureau d'études structure, Lamoureux & Ricciotti Ingénierie
- l'entreprise générale, Freyssinet
- l'entreprise de préfabrication, Bonna Sabla
- le bureau de contrôle, Socotec

Dans un paysage millénaire et sauvage, les objectifs, presque contradictoires, sont d'aménager le site pour l'accueil et la sécurité du public, tout en respectant la richesse naturelle du lieu : plan d'eau naturel, roche calcaire, chênes centenaires, végétation sauvage et faune endémique.

La passerelle créée participe à la maîtrise de la sur-fréquentation du lieu (jusqu'à 13000 personnes par jour) tout en permettant aux piétons de rejoindre en toute sécurité le site, et ne plus passer à pied par la route nationale trop dangereuse. Elle franchit ainsi une brèche naturelle de 70 m de long et de 10 m de profondeur.

Le contexte suggère donc un ouvrage à la fois sans appui intermédiaire, c'est-à-dire un franchissement de 70 m en une seule fois, et limitant au minimum son impact visuel en élévation, donc sans arc ni haubans.

La passerelle est ainsi formée de deux poutres isostatiques parallèles formant garde-corps.

Le matériau constitutif de l'ouvrage, le Ductal FM, de la famille des Bétons Fibrés à Ultra-haute Performances (BFUP), est notamment choisi dans l'objectif de résoudre de manière élégante l'ensemble de ces contraintes techniques et environnementales.

D'une manière générale, la construction de cette passerelle est donc l'occasion de développer des technologies optimisées pour s'intégrer silencieusement dans ce site sauvage :

- au niveau structurel : le BFUP permet par sa très haute résistance en compression de mettre en œuvre des précontraintes très importantes. Les deux poutres sont optimisées suivant une forme d'os permettant de limiter l'impact paysager de l'ouvrage avec un élancement ultra-élevé (hauteur statique totale 1,80 m, portée 67,5 m). Une largeur utile de 1,88 m pour les piétons et les cyclistes, est ensuite libérée entre les deux poutres-os
- au niveau des procédés de construction : la totalité de l'ouvrage est préfabriqué en atelier. La passerelle est réalisée suivant 15 voussoirs monolithiques de 4,60 m préfabriqués à partir d'un seul moule, comprenant les deux poutres garde-corps et 3 traverses, le tout coulé en seule fois. Les voussoirs sont ensuite transportés puis assemblés par précontrainte par post-tension sur un cintre. Le chantier est donc plus court, plus simple, avec un impact sur site limité au minimum et des conditions de sécurité en chantier améliorées
- en termes de durabilité : les caractéristiques mécaniques des BFUP, notamment leur exceptionnelle résistance aux agressions chimiques, permettent d'envisager une maintenance réduite et une durabilité de l'ouvrage maximale, contrairement aux ouvrages classiques en charpente métallique ou bois
- en termes d'impact environnemental global : les sections BFUP sont à la fois très minces et ont un haut rendement mécanique (100% de la matière est structurelle). Cette utilisation du matériau béton se caractérise donc par des faibles quantités de matière qui sont en outre associées à des cycles de production industrielle courts et simples (par rapport à l'acier). Le bâti consomme ainsi très peu d'énergie primaire, est responsable de faibles émissions polluantes de l'air et de l'eau, et ne participe pas à l'épuisement des ressources naturelles
- au niveau du coût et des délais : les études, la préfabrication, les méthodes constructives, et la mise en œuvre de précontraintes très importantes, permettent une maîtrise des délais : 3 mois de préfabrication, 1 mois de préparation du site, 1 semaine de pose et réglage, 1 semaine de démontage, soit moins de deux mois sur site. De même, les coûts (980 000 €) deviennent compétitifs par rapport aux solutions métalliques et bois, avec en plus un coût d'entretien quasi-nul (pas de réfection des systèmes de protection contre la corrosion etc.)



Fig. 1 Vue d'ensemble

Les défis technologiques présentés sont détaillés dans les paragraphes suivants. Ils concernent, notamment :

- la définition géométrique des pièces, des moules et des systèmes de précontrainte
- la nature des matériaux utilisés et leur validation expérimentale
- l'étude des comportements vibratoires, notamment aéro-élastiques
- la préparation du site, les méthodes de pose, de réglage et de mise en précontrainte
- les essais de fonctionnement

Le DUCTAL FM	Ductal FM Gris, formulation 3GM2.0
Caractéristiques pour la passerelle:	Fournisseur : LAFARGE Ciments
Formulation : Fibres : Métalliques, 2,15% en volume	Caractéristiques mécaniques : Résistance à la compression : 180 MPa
E/C : 0,19 à 0,21	Résistance à la compression : 7,5 MPa
Cure : Traitement thermique à 90°C, pendant 48h., à 100% de H.R.	Module de Young : 50 000 MPa
	Durabilité : Densité : 2,5
	Porosité capillaire : 0,5 à 0,7%
	Porosité totale : 1,9 à 2,8 %

## 2. Etudes d'exécution

Les études d'exécution et de méthodes ont été menées en interne par le département technique de Freyssinet France. Si le calcul d'une passerelle isostatique précontrainte n'est plus depuis longtemps une nouveauté, l'élancement rendu possible par les exceptionnelles qualités du Ductal génère plusieurs problèmes :

- La mise en œuvre de gaines de précontraintes et d'ancrages dans des sections aussi réduites.
- La faible épaisseur de l'âme de la poutre, générant des risques de déversement de la membrure supérieure comprimée.
- La souplesse de la structure, avec les risques de mise en résonance par les piétons et le vent.

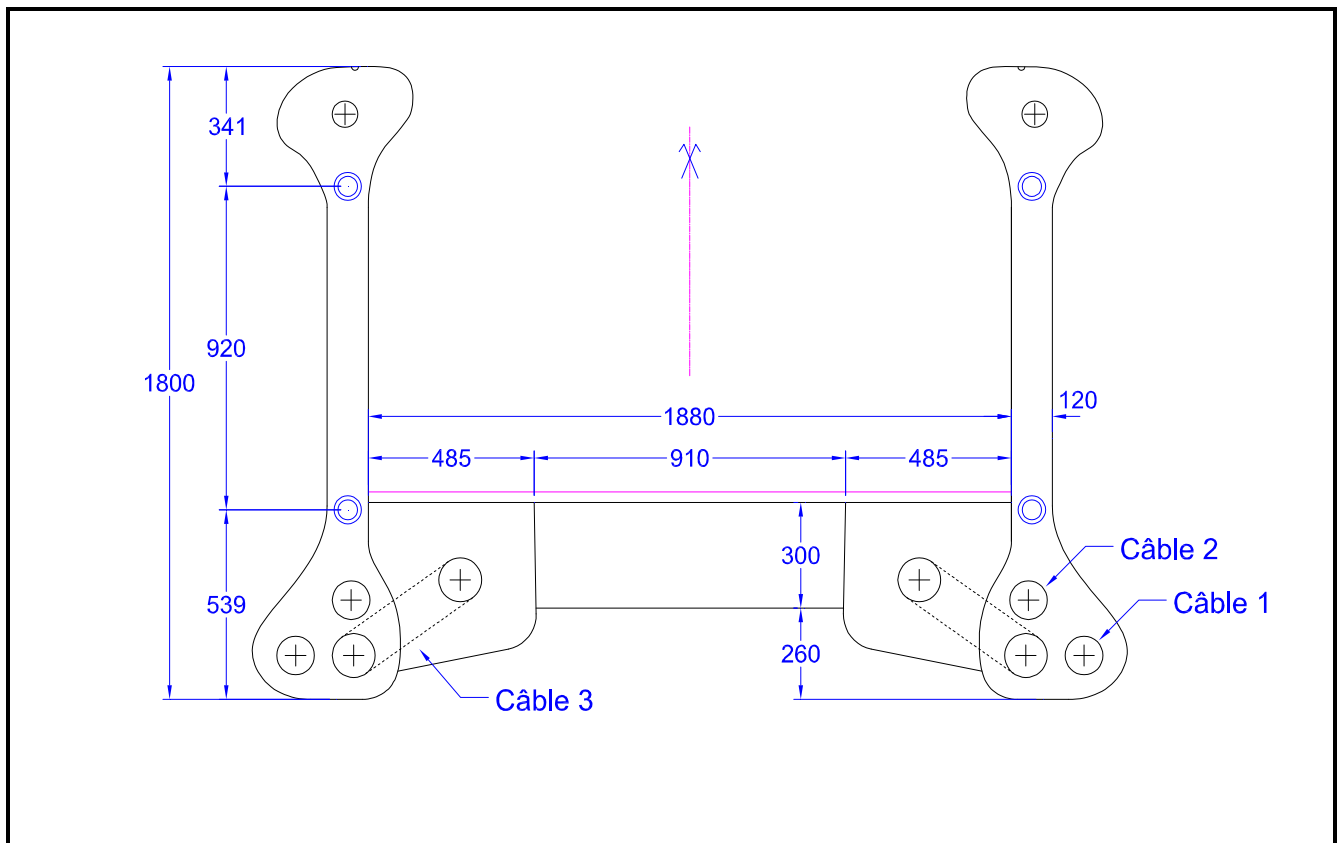


Fig. 2 Coupe sur voussoir avec bossage et cotes principales

Le premier point, l'exiguïté des sections, consiste à faire rentrer les trois gaines de précontrainte dans une membrure inférieure de seulement  $0,10 \text{ m}^2$  de section, tout en ménageant une « cheminée » pour le passage de la gaine de coulage. Avec ces impératifs, le respect des dispositions habituelles en précontrainte, soit un enrobage de béton équivalent au diamètre de la gaine, n'était pas possible. L'enrobage a été réduit à un rayon de gaine seulement. Cette réduction est justifiée par les arguments suivants:

- Utilisation de torons gainés protégés, donc rôle protecteur de l'enrobage réduit.
- Utilisation du Ductal, donc risque réduit de fissuration grâce à la présence des fibres métalliques.

Le deuxième point, déversement de la membrure supérieure, est classique dans les passerelles en charpente métallique dont les poutres forment garde-corps. Il a conduit à imposer des précisions importantes en alignement longitudinal des voussoirs, à savoir un défaut d'alignement limité à  $0,012^\circ$  (un millimètre désaligné sur la longueur d'un voussoir).

Le troisième point, souplesse de la structure, permet paradoxalement de supprimer tout problème de confort des piétons : avec un mode fondamental de flexion verticale à  $0,85$  Hertz seulement, et le premier harmonique à  $4 \times 0,85 = 3,4$  Hz, tout risque de mise en résonance par la marche des piétons (soit une fréquence excitatrice de l'ordre de 2Hz) était exclu. Par contre, les phénomènes de détachement tourbillonnaire et de galop devenaient dès lors problématiques. Le paragraphe suivant revient sur ces phénomènes.

Enfin, le contreventement de la structure s'est révélé plus problématique que ce qu'avait laissé penser la première analyse. En effet, le platelage ne peut être coulé en même temps que les voussoirs. La transmission de l'effort de vent transversal (25t ELU aux appuis) ne peut donc être assurée sans liaison mécanique platelage / voussoir, liaison difficile à assurer dans l'épaisseur de 4cm seulement du platelage. Le problème a finalement été résolu en intégrant en sous-face de platelage des nervures formant croix de Saint-André. Les nervures sont simplement appuyées sur l'angle poutre principale / traverse par l'intermédiaire d'un mortier de calage. Le fonctionnement est donc celui d'une poutre métallique à treillis classique, si ce n'est qu'ici ce sont les diagonales qui sont comprimées et les traverses (ferraillées en conséquence) qui sont tendues.



Fig. 3 Détail d'une croix de St-André en sous-face de platelage

Au final, chaque poutre formant garde-corps reçoit la précontrainte suivante :



En membrure inférieure : un câble 13T15S filant d'un bout à l'autre.  
un second câble 13T15S, sur bossage, du voussoir 2 au voussoir 14.  
un câble 19T15S, sur bossage, du voussoir 3 au voussoir 13.

En membrure supérieure : un câble 4T15S filant d'un bout à l'autre.

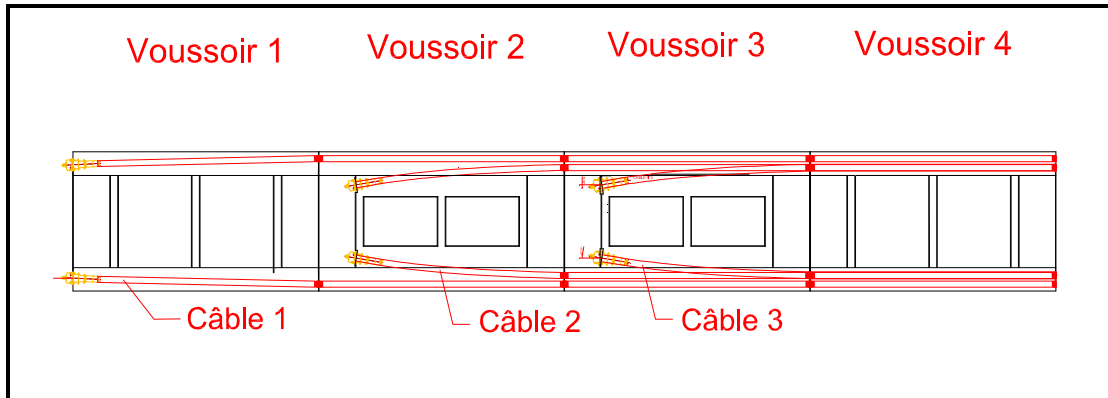


Fig. 4 Câblage, vue par dessus

**Le ferrailage passif est réduit.** Seules les traverses et les bossages d'ancrage sont ferrillés.

### 3. Comportement aéroélastique.

Le comportement vibratoire de l'ouvrage a été soumis à deux analyses :

- analyse de la réponse vibratoire de la passerelle sous l'action des piétons, conformément au Guide Méthodologique du SETRA
- analyse du comportement aéro-élastiques, détachements tourbillonnaires et instabilité au galop, à partir de l'Eurocode 1

L'élanement très élevé de l'ouvrage a pour corollaire un comportement dynamique qu'il est nécessaire d'analyser finement. Les modes propres, issus de l'analyse modale (calculs analytiques et calculs aux éléments finis) sont les suivants :

- premier mode, flexion longitudinale verticale, 0,85 Hz
- deuxième mode, flexion longitudinale horizontale, 1,85 Hz
- troisième mode, torsion longitudinale, 2 Hz
- quatrième mode, flexion longitudinale verticale, 3,4 Hz

Ce comportement modal a permis de se placer dans des niveaux de confort pour les piétons jugés satisfaisant, avec des risques de mise en résonance faibles voire négligeables suivant les modes et des accélérations faibles.

En revanche, les sollicitations transversales dues au vent ont montré, suivant l'approche Eurocode, des risques d'instabilité pour des vitesses de vent modérées, et donc avec une probabilité de sollicitations soutenues non négligeable.

L'approche Eurocode est fortement dépendante de coefficients, avec des valeurs disponibles qui représentent de manière trop lointaine le comportement réel de la passerelle.

Une étude en soufflerie (CSTB Nantes – équipe de M. Grillaut) a été réalisée.

Les résultats expérimentaux et les calculs théoriques ont alors démontré des résultats convergents sur le comportement de la passerelle, et, notamment sur la grande efficacité d'un système d'amortisseur de masses accordées.

Ces éléments ont ensuite été étudiés, réalisés puis réglés par la Société GERB avec Michel Maillard. En fin de chantier, les tests de chargement dynamique ont confirmés les calculs théoriques et les simulations en soufflerie.

## 4. Préfabrication des voussoirs et des platelages.

### 4.1. Voussoirs

#### 4.1.1. Moule:

Moule acier permettant un moulage à l'envers, c'est-à-dire les ailes du « U » vers le bas. Cette solution a permis d'obtenir une surface parfaite des hauts de garde corps (très important pour l'esthétique de la passerelle). La structure du moule permet de déplacer ensuite les jouées de coffrage des garde corps sans opération de retournement de manière à démouler la pièce une fois maturée. Le moule, parfaitement étanche au droit de chaque joint, est modulable et permet ainsi de fabriquer les 15 éléments de la passerelle.

La pose n'étant réalisée à « joints conjugués » et pour permettre de transmettre au plus juste les efforts de post contrainte, le moule a été réalisé avec la plus grande précision. Pour obtenir cette précision, la technologie retenue a été, pour les jouées d'extrémités, un usinage par rectification. La précision obtenue a été inférieure à 0.2mm en planéité et 0.3mm en dimension.



Fig. 5 Vue du moule

Le choix d'utiliser des jouées de moule usinées plutôt qu'un coulage plus classique en joints conjugués a été retenu pour les raisons suivantes :

- Possibilité de couler d'abord les 11 voussoirs courants, puis les 4 voussoirs avec bossages d'ancrage des câbles, avec une seule opération de modification du moule, au lieu de 4 avec des voussoirs coulés « dans l'ordre ».
- Réalisation du voussoir « n+1 » dès décoffrage du voussoir « n », au lieu d'attendre la fin de son étuvage. Ainsi, il a été possible de réaliser 2 voussoirs par semaine, au lieu d'un seul en joint conjugué.
- Suppression du calage angulaire entre 2 voussoirs, délicat à réaliser dans le cas de joints conjugués.

#### 4.1.2. Préparation du Ductal

Les voussoirs ont été réalisés à l'usine Bonna Sabla de Vendargues dont le malaxeur a été validé en collaboration avec Lafarge sur des bétons de convenances et le prototypage d'éléments similaires.

Comme pour toutes les affaires en Ductal FM, un essai de convenance et un plan de contrôle très strict a été mis en place pour la validation de chaque étape de la fabrication, avec notamment, pour

chaque gâchée, des mesures de l'étalement et de la température, qui sont des éléments clés pour garantir la non ségrégation des fibres.

Tous les essais de caractérisation du matériau ont été également faits en collaboration avec le laboratoire central de Lafarge qui opère en fait un contrôle externe.

#### 4.1.3. Procédures de coulage

La préparation du béton des voussoirs (environ 4 m<sup>3</sup>) est réalisée en cinq gâchées successives d'environ 800 litres.

Le mode de coulage a été mis au point en collaboration avec les techniciens de Lafarge notamment pour le bon mariage des différentes gâchées, et pour l'orientation des fibres en fonction de l'écoulement du matériau.

#### 4.1.4. Finition / cure

A la fin du coulage une cure a été réalisée.

Parallèlement des éprouvettes ont été prélevées lors des fabrications et ont été placées dans les conditions identiques de cure du produit de manière à réaliser des essais de compression avant démoulage et valider ce dernier.

#### 4.1.5. Démoulage et traitement thermique

Le démoulage a été effectué par « pelage » du moule, le produit restant en place.

Après démoulage, le produit a été transporté sur le poste de traitement thermique. Le produit a reçu un traitement thermique avec maintien de température à 90° pendant 48 heures en ambiance saturée. L'énergie mise en œuvre a été de la vapeur vive pilotée par une régulation.

La manutention des produits a été réalisée à partir d'inserts placés aux points calculés pour opérer cette manutention à jeune âge. Un palonnier spécifique a permis un levage supprimant les efforts parasites aux directions de traction directe. En effet, même si les caractéristiques à 48 heures du Ductal sont très élevées, les ancrages de manutention sont placés pour des raisons esthétiques dans les traverses de section réduite : 15x30 cm<sup>2</sup>.

L'ensemble des éprouvettes prélevées à la fabrication pour les tests de compression et flexion, sont traitées dans les mêmes conditions aux postes de traitement.

Le produit après ce traitement thermique est stocké. A noter que l'ensemble des inserts est en inox pour éviter toute sujétion de protection ultérieure.

#### 4.1.6. Retournement

Après traitement thermique, les produits ayant acquis toutes les caractéristiques mécaniques nécessaires, ont été retournés de façon classique au retourneur à sangles.

## 4.2. Platelage :

45 dalles réalisées par moulage à plat avec contre moule pour la fabrication des nervures. Pour la problématique de la glissance de surface de ces dalles un traitement a été opéré pour obtenir sans intervention ultérieure, des valeurs au SRT inférieures à 0,35.

Le platelage a été monté en usine pour les dalles de milieu d'élément et sur le chantier pour les dalles de liaison entre élément.

## 5. Mise en oeuvre

### 5.1. Cintre

Le site imposait le respect de la grande végétation jouxtant la passerelle, des dépôts pierreux présents sur le fond du talweg et des espèces de grenouilles endémiques qui avaient été observées dans le ruisseau.

Les étalements ont été posés sur des barrettes transversales préfabriquées en béton armé, afin de réduire la contrainte au sol. Ces aménagements ont été limités à 3,00 m de largeur et en minimisant les apports de matériaux, ceux-ci devant être retirés en fin de travaux. Le talus Sud, très pentu, a dû être traité d'une façon originale compte tenu de la fragilité de la stabilité de l'ensemble : des aménagements en terrasses ont donc été réalisés par les équipes de l'entreprise, manuellement et au moyen d'une mini pelle. Des murs de soutènement « en cascade » ont ensuite été formés à l'aide de caniveaux préfabriqués du commerce.

En partie centrale, la hauteur du cintre est de 10m.



Fig.6 Vue du cintre en cours de montage

### 5.2. Pose et réglage des voussoirs

Deux filières HEB160 ont été disposées dans des fourches en têtes d'étalement. Elles ont été réglées au demi-centimètre en respectant la contre-flèche de 65cm à mi-travée.

Les voussoirs ont été posés sur ces filières avec une grue de 300t. Trois sabots de réglage sont interposés à chaque voussoir entre filière et sous-face de poutre. La photo n°7 permet de remarquer les palonniers de manutention et les sabots de réglage.





Fig. 7 Vue de la pose d'un voussoir

Les réglages nécessaires à l'alignement transversal et vertical des éléments ont été opérés à l'aide des vis intégrées aux sabots. Ce réglage a été effectué sous contrôle géométrique continu au 1/10<sup>ème</sup> de millimètre. Le collage a été assuré par une colle époxy mise en place manuellement sur les abouts de poutres.

### 5.3. Réglage, serrage provisoire.

Les éléments ont été rapprochés et serrés à l'aide de vérins annulaires et barres Freyssibar :

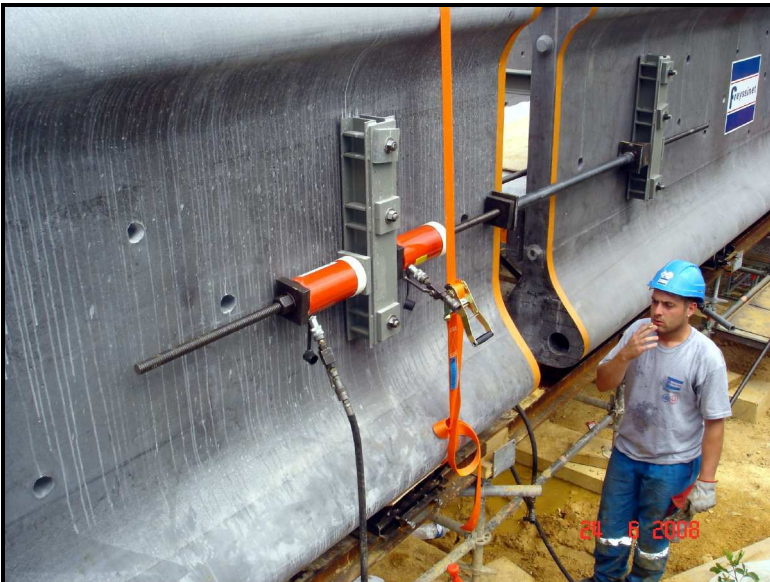


Fig. 8 Vue du système de serrage provisoire

Un premier serrage est effectué à blanc, afin de vérifier la bonne adéquation des pièces entre elles. Les pièces sont ensuite écartées, encollées puis resserrées et mises en pression.

#### 5.4. Enfilage, injection, mise en tension.

Les câbles de précontrainte gainés protégés ont été enfilés et injectés de façon classique. Ils ont été mis en tension au vérin monotoron, l'espace disponible entre tête d'ancrage et poutre transversale ne permettant pas la mise en œuvre des vérins 19T15 ou 13T15.

Pour les 2 câbles les plus longs, cependant, l'ordre classique injection / mise en tension a dû être inversé. En effet, la période des travaux (début juillet) conjuguée à la couleur noire des voussoirs générait de fortes variations thermiques en cours de journée, de sorte que les joints s'ouvraient en partie basse l'après-midi sous l'effet du gradient. L'injection n'étant pas possible dans ces conditions, les deux câbles, hauts et bas, qui vont d'un bout à l'autre de la passerelle ont été mis en tension avant injection, afin de refermer les joints. Ces câbles étant rectilignes, il n'y avait pas de risque de « nœuds » entre torons.

#### 5.5. Décintrage et pose sur appuis

Après mise en tension de 37 torons par poutre (sur 49 au total), la passerelle est capable de reprendre son poids propre et la surcharge de chantier. Pour éviter un report de masse excessif sur les rives du cintre, la passerelle a été décintrée à l'aide de vérins plats. Après réglage en niveau à l'aide des vérins, on a procédé au matage entre appuis néoprène et sous-face de poutre, puis la passerelle a été posée sur ses appuis définitifs. Les torons restant ont alors été mis en tension.

#### 5.6. Mise en œuvre des amortisseurs de masse accordée

Les deux amortisseurs sont implantés de part et d'autre du voussoir central, au droit des zones de joint. Ils sont bien entendu mis en œuvre avant pose des platelages. La fréquence propre et le taux d'amortissement de l'ouvrage sont mesurés in situ, par mise en résonance de l'ouvrage et contrôle à l'accéléromètre. La mise en résonance est obtenue par simple genuflexion, contrôlée au métronome, de 4 personnes. Le système est ainsi réglé en fonction de la fréquence réelle de l'ouvrage, et l'efficacité de l'amortissement est contrôlée.



Fig. 9 Mise en œuvre des amortisseurs dynamiques

### 5.7. Finitions, essais

Après pose des platelages situés au droit des joints, la passerelle est terminée. Les épreuves sous trois quarts de la charge nominale ont été réalisées par mise en charge avec les barrettes B.A. de fondations et les HEB160 des filières.

## 6. Conclusion

Au-delà du défi technique consistant à réaliser un ouvrage hors du commun de par son matériau, sa forme et son élancement, reste le souvenir d'un travail d'équipe dans lequel chaque acteur, de la Maîtrise d'œuvre aux entreprises, a su mettre du sien pour résoudre au mieux les problèmes posés par chaque phase de la conception puis de la réalisation.

L'ouvrage a, de plus, l'ambition de présenter, à l'échelle des cycles de vie, une entité environnementale intelligente, avec une empreinte écologique très limitée et un besoin de maintenance réduit.

Enfin, l'ensemble des procédés constructifs, est porté par des métiers et savoir-faire pérennes et locaux.