

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 135 (2009)
Heft: 19: Structures métalliques

Artikel: Franchir le bras de Pirmil
Autor: Thomann, Michel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99783>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.12.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Franchir le bras de Pirmil

Le pont Léopold Sédar Senghor – du nom d’un ancien Président du Sénégal – franchit la Loire à Nantes. Cet ouvrage mixte acier-béton, d’une longueur totale de près de 300 mètres, a été conçu par l’architecte parisien Marc Mimram. Il est réalisé par les entreprises Quille (fondations, piles et tablier) et Zwahlen & Mayr (charpente métallique).

Situation et contexte

Le pont sur le bras de Pirmil est un des maillons d’un projet urbain décidé par Nantes Métropole, entité administrative regroupant la Ville de Nantes et les communes alentours, visant à améliorer les connexions urbaines pour le trafic local

tout en délestant les axes de transit autour et au-travers de Nantes. Le pont sur le bras de Pirmil relie ainsi la commune de Saint-Sébastien sur Loire, au Sud, à l’Île de Nantes (fig. 1 et 2). Destiné avant tout au trafic local, le Pont Léopold Sédar Senghor fait la part belle à la mobilité douce, puisque sur les 16 mètres de largeur du tablier, 10 sont dédiés aux piétons et aux cyclistes. L’architecte décrit d’ailleurs l’ouvrage comme une « passerelle accueillant les voitures ».

La Loire est navigable à Nantes. En plus des bateaux de plaisance, quelques navires commerciaux empruntent la voie navigable. Par conséquent, une passe navigable doit rester disponible non seulement entre les piles de l’ouvrage définitif, mais également durant toute la durée des travaux.



Fig. 1 : Vue d'ensemble de l'ouvrage en construction

Fig. 2 : Situation de l'ouvrage

Fig. 3 : Elévation et vue en plan (Plan atelier Marc Mimram, Paris)

Fig. 4 : Coupes types sur pile et en travée (Plan atelier Marc Mimram, Paris)

Fig. 5a et 5b : Géométrie des semelles supérieures et inférieures des quatre poutres principales

Projet architectural

Le concepteur de l'ouvrage, l'atelier Marc Mimram à Paris, s'est inspiré de la tradition des ponts nantais qui, à de rares exceptions près, sont des poutres continues à inertie variable¹. Dédié principalement à la mobilité douce, l'architecte a cherché la transparence et la légèreté. Cela se remarque non seulement dans la charpente en acier, mais également dans la conception des piles : puisque celles-ci ne supportent pas de réactions horizontales sous l'effet du poids propre, elles peuvent être rendues très fines sur toute leur hauteur. La croissance progressive des portées en s'approchant du centre du fleuve confère également légèreté et dynamisme à l'ouvrage.

Description de l'ouvrage

L'ouvrage franchit la Loire au moyen de six travées de irrégulières conduisant à une longueur totale de 298 mètres (fig. 3). Le système statique de l'ouvrage est une poutre continue d'inertie variable, dont l'intrados se sépare du tablier à l'approche des piles pour former des bracons, sortes d'arcs surbaissés. Longitudinalement, le point fixe de l'ouvrage se situe au centre, sur la pile P3. Les autres piles, de même que les culées, sont munies d'appuis glissants.

Vu en plan, l'ouvrage présente un biais de 10° sur toutes les piles ainsi que sur la culée C0, car le tracé de l'ouvrage est biais par rapport à l'axe de la Loire et les piles ont été disposées parallèlement au courant. Le biais atteint 23° sur la culée C6. La superstructure de l'ouvrage est constituée d'une dalle en béton reposant sur quatre poutres principales en acier entretoisées tous les cinq mètres (fig. 4). Des consoles perpendiculaires à l'axe de l'ouvrage, également disposées tous les cinq mètres, supportent les trottoirs. La largeur hors tout vaut 16,10 mètres. La dalle en béton supporte deux voies dédiées au trafic routier et deux bandes cyclables. Les trottoirs, d'une largeur de trois mètres chacun, servent aux piétons. On peut encore observer sur la figure 4 que les quatre poutres principales en acier sont des caissons dont les âmes sont inclinées.

La dalle en béton est constituée de prédalles de 11 cm d'épaisseur, recouvertes par 13 cm de béton coulé en place. Le bétonnage se fait par pianotage de manière à limiter les contraintes de traction dans le béton, en particulier dans les zones de moment négatif. Cette méthode de bétonnage consiste à bétonner d'abord les zones de travée puis de claver les zones sur piles dans un second temps. Les bordures sont préfabriquées. Les trottoirs en bois reposent sur trois

¹ Atelier Marc Mimram, Franchissement de la Loire, pont du bras de Pirmil, notice architecturale, Paris, 2007

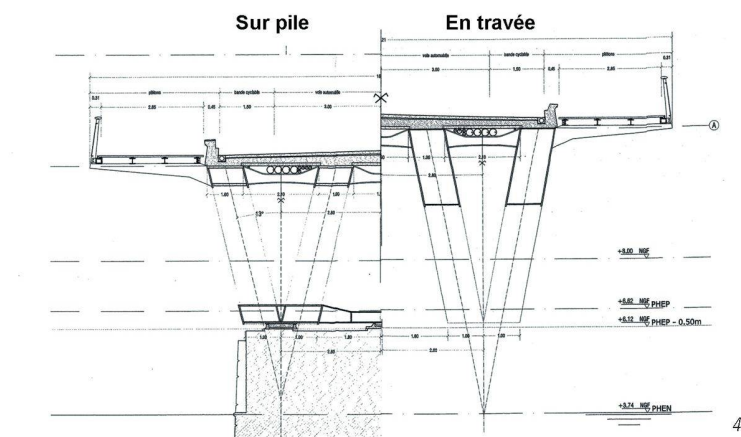
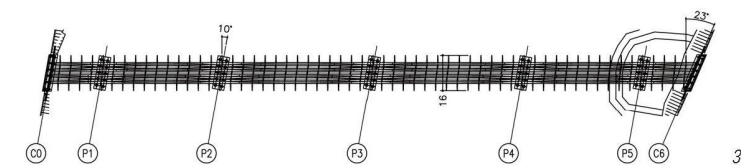
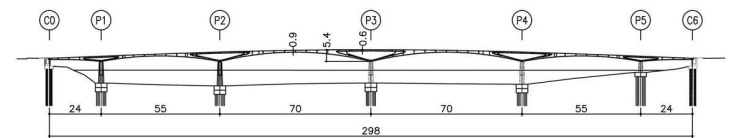


Fig. 6 : Découpage de la charpente en atelier pour le transport et le montage

Fig. 7 : Gabarit d'assemblage pour gauchir les âmes selon la géométrie voulue

Fig. 8 : Perspective d'une palme

longerons métalliques (HEA160) et un caisson de bord servant également à fixer le garde-corps.

Les appuis, au nombre de 18 (4 par culée et 2 par pile), sont des appuis à pot. A cause du rapport entre la longueur de la travée de rive (24m) et la première travée intérieure (55 m), les réactions d'appuis des culées sont négatives (poussées vers le haut) sous charges de service déjà. Les culées sont donc équipées de dispositifs antisoulèvement.

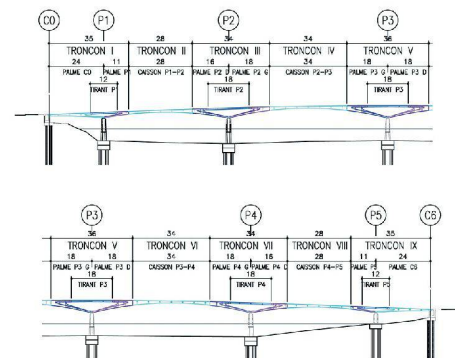
Charpente métallique

La charpente métallique pèse 2450 tonnes. Les tôles sont en acier S355K2 +N pour les épaisseurs inférieures ou égales à 30 mm et pour les longerons HEA160. Au-delà, et jusqu'à 80 mm, les tôles sont livrées en qualité S355N. Tous les tôles et profils sont laminés par des usines certifiées NF Acier, conformément aux exigences du fascicule 66 de la réglementation française.

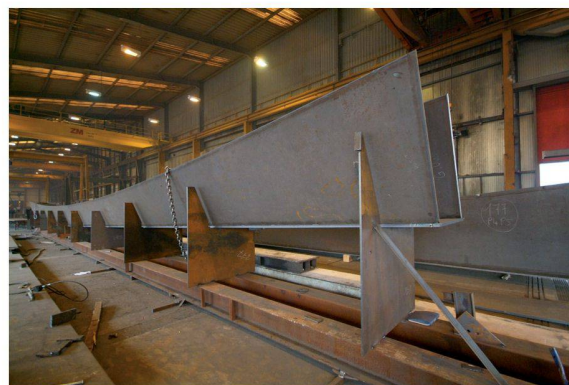
Comme mentionné plus haut, la géométrie de l'ouvrage est rendue complexe par l'inclinaison des âmes et le biais de l'ouvrage. Cette inclinaison n'est pas constante le long de l'axe de l'ouvrage, mais varie entre 10° et 21°. Par conséquent, les âmes des poutres principales constituent des surfaces gauches. En plan, la semelle supérieure de ces quatre poutres en caisson est rectiligne, alors que la semelle inférieure est courbe (fig. 5). Au droit des piles, les semelles inférieures se rejoignent deux par deux, elles sont le plus éloignées à mi-travée.

Eu égard à la méthode de montage, le découpage de l'ouvrage pour la fabrication en atelier et le transport a été défini selon la figure 6. Les poutres principales sont ainsi divisées en caissons (pour les travées), palmes (bracons joignant les piles au tablier) et tirants (extrados de l'ouvrage au droit des piles). La longueur de ces éléments varie de 11 à 34m, leur poids de 11 à 41 to, ce qui les rend transportables par camion.

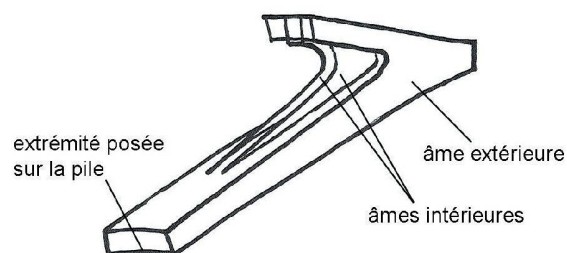
Les palmes sont les éléments les plus complexes de l'ouvrage, de par leur poids et leur taille, mais surtout à cause de leur géométrie. En effet, pour assurer le transfert des efforts du bracon au tablier, il a été nécessaire d'ajouter deux âmes aux caissons. Ces deux âmes (fig. 8 et 9), sont disposées à l'intérieur des caissons et ne sont plus visibles, une fois l'ouvrage terminé, que dans le creux de la pièce. Le fort raidissage des palmes doit croiser ces âmes intérieures dans un enchevêtrement complexe à assembler et à souder. Les tôles formant le raidissage intérieur des palmes sont de qualité Z35 pour prévenir l'arrachement perpendiculaire au plan de la tôle sous l'effet du retrait des soudures. Pour garantir une géométrie correcte, des gabarits d'assemblage (fig. 7)



6



7



8

ont systématiquement été employés en atelier. Ils ont servi pour l'assemblage, puis pour le contrôle géométrique après soudage.

Les caissons, qui sont les pièces les plus longues de l'ouvrage, et les tirants ne présentent pas de difficulté particulière, si ce n'est les âmes gauches. Le raidissage intérieur est simple : un diaphragme vertical est situé tous les cinq mètres au droit des axes des entretoises et des consoles.

De nombreux contrôles géométriques ont été effectués en atelier. Toutefois, comme la fabrication des pièces a duré près de huit mois, au fur et à mesure de l'avancement du chantier, il n'a pas été possible d'effectuer un montage à blanc complet de l'ouvrage et seuls les premiers tronçons, de la culée



9

C0 à la pile P1, ont été assemblés à blanc avant expédition. Pour le reste de l'ouvrage, la correspondance géométrique des sections au droit d'un joint de chantier a été assurée en mesurant en atelier après soudage les dimensions de la première pièce prête à partir sur le chantier, et en adaptant au besoin celles de la seconde en fin de fabrication. Cette méthode a donné de bons résultats. Un découpage des cordons d'angle entre les âmes et les semelles sur environ 500 mm depuis l'extrémité de chaque pièce était de plus prévu pour effectuer les derniers réglages sur chantier.

Montage, contraintes et installations

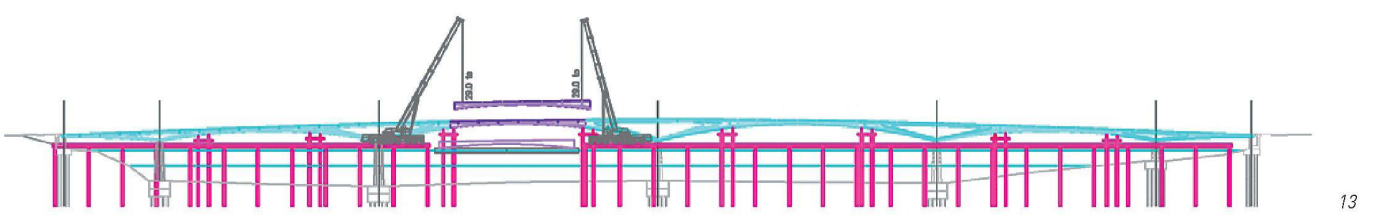
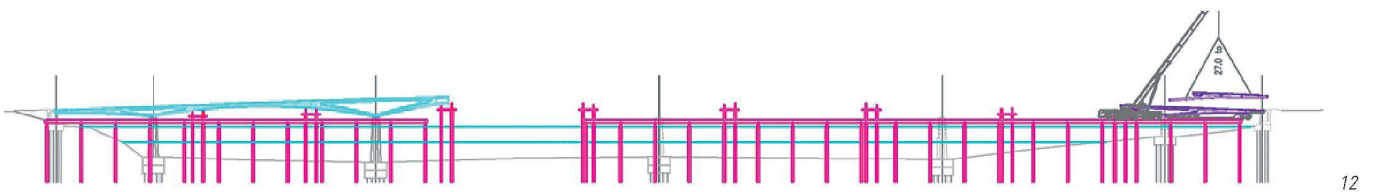
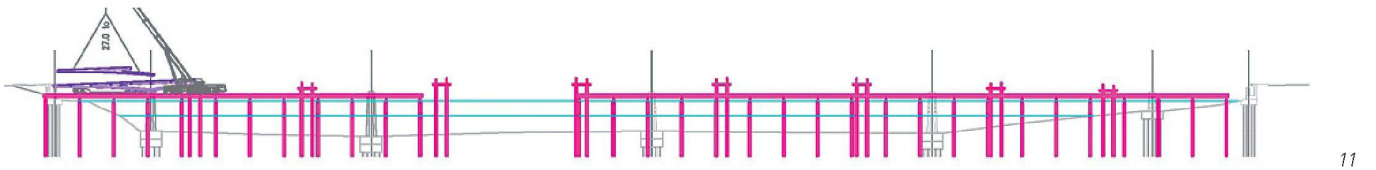
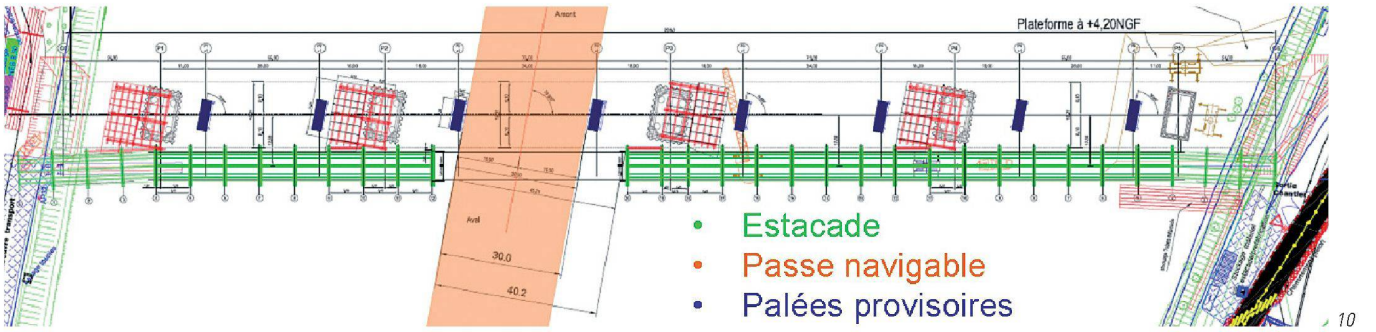
A cause d'un espace disponible restreint à proximité des deux culées, de la géométrie de l'intrados ainsi que pour permettre le maintien d'une passe navigable durant toute la durée du chantier, il n'était pas envisageable de lancer le pont par-dessus la Loire. Un montage à la grue a donc été retenu. Pour ce faire, une estacade provisoire située à côté du

pont définitif a été fichée dans la Loire en début de chantier (fig. 10 et fig. 14, les grues sont situées sur l'estacade clairement visible au premier plan, devant l'ouvrage). Elle a servi aussi bien pour la réalisation des fondations et des piles que pour le montage de la charpente puis pour la pose des pré-dalles en béton. Comme illustré sur figure 9, l'estacade (en vert) est interrompue sur une largeur de 40 mètres environ pour libérer une passe navigable libre de tout obstacle.

Huit palées provisoires (en bleu sur la figure 9), situées approximativement au quart et aux trois-quarts de chaque travée, ont été construites pour poser les tronçons de charpente avant soudage. Les palées provisoires sont des étais intermédiaires, situées entre les piles en béton, constitués de quatre tubes en acier fichés en Loire et surmontés d'une plateforme de travail et d'appuis permettant de réceptionner les pièces de la charpente. Ces appuis sont munis de vérins. L'estacade et les palées provisoires seront retirées en fin de chantier.

Fig. 10 : Installations de chantier (Plan société Quille, Rouen)

Fig. 11 à 13 : Représentation schématique des phases de montage (1, 4 et 9)



Procédure et phasage

Le chantier a débuté en juillet 2008 et la réception de l'ouvrage par Nantes Métropole est prévue pour mars 2010. Les installations (estacade et palées), les pieux et les culées ont été terminés à fin 2008. Le bétonnage des piles, commencé en octobre 2008, s'est terminé en mai 2009. Le montage de la charpente métallique a débuté en février 2009 sur la culée C0. Ce montage a été schématiquement subdivisé en neuf phases de 30 mètres environ (fig. 11 à 13). Les phases 1 à 3 ont été menées sur l'estacade située du côté de la culée C0. A partir de la phase 4, le chantier a été alimenté par l'estacade située du côté de la culée C6. La neuvième et dernière phase de montage, dite de clavage, a permis de rejoindre les deux tronçons d'ouvrages construits depuis chaque culée. Le clavage se fait par-dessus la passe navigable. Le rythme de montage était d'une phase par mois en début de chantier, pour passer à moins de trois semaines en fin de chantier. La longueur des tronçons a été limitée à 34 mètres et leur poids à 40 t pour faciliter le transport et le levage des pièces.

Le clavage au droit de la passe navigable avec les caissons de la neuvième phase constituait l'étape la plus délicate du montage, en raison de la géométrie et des difficultés de levage.

Pour garantir que les caissons entreraient parfaitement dans l'espace libre, des mesures ont été réalisées tant sur chantier (distance libre) qu'en atelier (longueur des pièces) avant expédition. La longueur d'un des quatre caissons a dû être diminuée de 10 mm en atelier. De plus, pour faciliter l'introduction des caissons, la partie d'ouvrage déjà construite, soudée et déverinée des palées provisoires située entre C0 et la passe navigable a été tirée en direction de C0 de 30 mm, libérant ainsi du jeu pour la pose. Une fois les caissons de clavage posés, le même tronçon de pont (C0-P2) a été repoussé de 20 mm en direction de C6 de manière à obtenir un jeu de soudage conforme aux règles de l'art.

La cinématique de clavage est illustrée sur les figures 14 à 16. Elle permet l'utilisation exclusive de moyens terrestre – une variante consistant à acheminer les caissons de clavage par voie fluviale au droit de la passe navigable a également

Cinématique de clavage

Etape I : Déchargement du camion à l'aide de grues et pose provisoire sur l'ouvrage

Etape II : La pièce est levée par une grue et amenée en partie au-dessus de la passe navigable. La seconde grue s'est positionnée sur l'autre rive (côté C0) et reprend l'extrémité du caisson (à gauche). L'arrière de la pièce (à droite, côté C6) est reposé sur l'ouvrage.

Etape III : Le caisson est élingué aux deux extrémités, introduit dans la brèche et posé sur les palées provisoires.



14



15



16

Phases 1, 4 et 9

Phase 1 – Tronçon C0-P1 – février 2009

Phase 4 – Tronçon C6-P5 – mai 2009. Sur la gauche, les phases 1 à 3 ont été terminées du côté de la culée C0.

Phase 9 – clavage P2-P3 – août 2009. Les phases 4 à 8 ont été achevées depuis le côté de la culée C6.

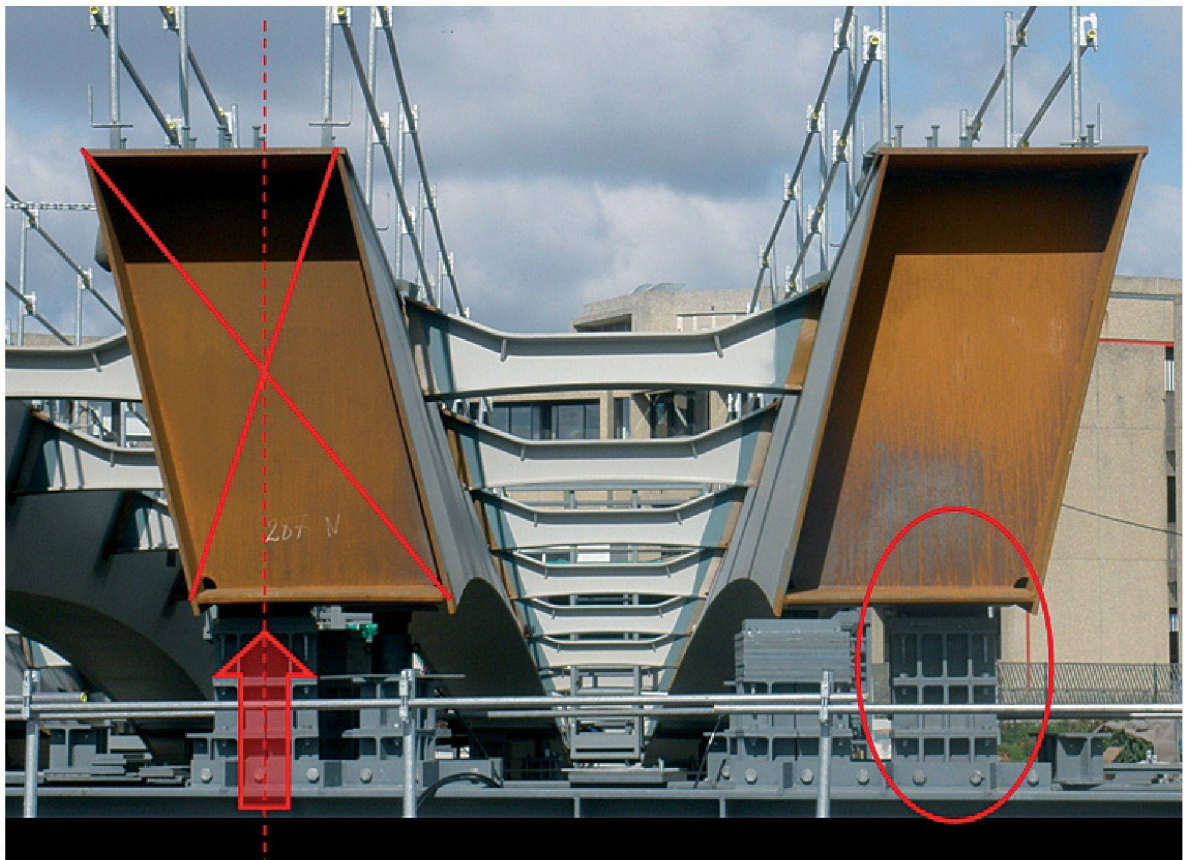
Fig. 17 : Position des appuis sur palées provisoires

été étudiée. Le caisson est dans un premier temps déchargé du camion au moyen de deux grues de 250 tonnes (étape I) munies de 97 tonnes de contrepoids pour être déposé sur l'ouvrage déjà soudé (zone P3-P4). Dans cette position, il peut être repris par une seule grue (étape II). La seconde grue passe alors sur l'autre rive et élingue l'extrémité (côté C0) de la pièce. L'arrière de la pièce est à nouveau déposé sur l'ouvrage existant, puis récupéré à l'autre extrémité (côté C6) par la première grue (étape III). Le caisson est finalement positionné sur les palées provisoires.

Au fur et à mesure que les joints des poutres principales étaient soudés et contrôlés, et que l'altitude des extrémités des consoles étaient réglées, les palées provisoires ont été dévêrinées au moyen de 8 vérins de 100 tonnes chacun. Lors de cette opération, des déformations verticales qui pouvaient atteindre jusqu'à 40 mm ont été mesurées, des valeurs correspondant à celles obtenues par calcul.

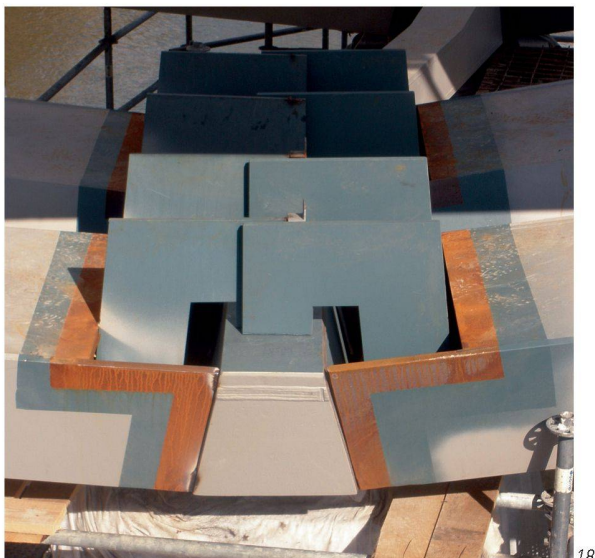
Dispositifs spécifiques

Quelques dispositifs spécifiques ont été imaginés pour le montage du pont, en particulier pour assurer sa stabilité avant le soudage. En effet, la géométrie particulière des poutres pose des difficultés de pose qui n'existent pas avec des poutres en I classiques. D'une part, l'inclinaison des âmes a pour conséquence que le centre de gravité des pièces est fortement excentré, ce qui crée un risque de basculement. D'autre part, la forte pente de l'intrados en élévation génère des réactions d'appuis horizontales importantes si aucune mesure n'est prise. Enfin, à cause de l'exiguïté des piles, il a été décidé de poser directement l'ouvrage sur les appuis définitifs, ce qui est très contraignant puisque ces appuis ne supportent que de faibles rotations (0,014 radian) et sont tous glissants longitudinalement à l'exception des appuis de P3. Pour garantir la stabilité contre le renversement des poutres, il a été nécessaire de décaler fortement le point d'appui par



17

Fig. 18 : Appareils pour centrer la réaction d'appui avant soudage des bracons sur le pied d'arc



18

Fig. 19 : Nacelle d'accès pour le soudage des entretoises latérales

(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par l'auteur.)



19

Protection anticorrosion

Si le pont de Pirmil franchit la Loire environ 50 km en mont de l'embouchure dans l'Atlantique, les marées refluent de l'eau saumâtre jusqu'à Nantes. L'atmosphère y est donc agressive pour l'acier, ce qui justifie une classification en classe C4. Selon la terminologie de l'ACQPA utilisée en France, le système retenu devait donc être un système C4ANV. La teinte de finition, choisie sur la base d'un essai de convenance sur l'ouvrage, est un oxyde de fer micacé proche d'un RAL 9006 (aluminium).

Le système est composé d'un primaire zinc-époxy de 50 µm et d'un intermédiaire époxy-vinyle de 140 µm, tous deux appliqués en atelier. La finition est un polyuréthane de 40 µm d'épaisseur, entièrement appliqué au chantier en raison des multiples joints soudés. De nombreuses reprises, particulièrement visibles avec les finitions métallisées, ont ainsi pu être évitées.

Comme pour les travaux de soudage, l'utilisation de moyens d'accès adaptés à la géométrie et simples à manutentionner constituaient la clé d'une application économique et de qualité de la peinture sur chantier. La réfection des joints soudés (sablage, primaire, intermédiaire) a été effectuée à l'aide de paniers légers et d'échafaudages en aluminium. L'application de la finition a été réalisée sur les trottoirs au moyen d'un chariot roulant spécialement conçu pour ce chantier. L'application de la finition sur les poutres principales, actuellement en cours, se fait au moyen d'un camion à nacelle négative.

Travaux de soudage

Le soudage sur chantier a été réalisé selon le procédé 114 (Innershield), soit avec un fil fourré sans protection gazeuse. Le soudage en atelier est effectué en règle générale au procédé 136 (fil fourré avec protection gazeuse), au procédé 135 (fil nu avec protection gazeuse) pour certaines racines et au procédé 121 (procédé automatique, sous flux) pour les rabotages de tôles ainsi que certaines soudures de reconstitution des caissons.

Les travaux de soudage constituent près de 50% des heures sur chantier (9'000 heures sur un total de 19'000). La maîtrise du planning et des travaux préparatoires était donc nécessaire pour mener l'opération dans les délais. L'accès aux différents joints était également cruciale pour optimiser le travail des soudeurs. A cet effet, différentes nacelles ont été développées et réalisées spécifiquement (fig. 19). Ces nacelles doivent s'adapter à la géométrie variable de l'espace entre les poutres principales (âmes gauches, semelles inférieures des caissons courbes en plan). De plus, des trappes d'accès ont été prévues dans la semelle supérieure des palmes pour permettre une préparation des joints de rabotages des poutres principales en X plutôt qu'en V.

Le surplus de soudage nécessaire à la fermeture des trappes a été jugé inférieur au temps économisé par une telle préparation, en particulier pour le soudage des semelles inférieures qui a pu être largement réalisé au plancher plutôt qu'au plafond.

rapport au milieu de la semelle inférieure de chaque poutre (fig. 16). Par mesure de sécurité et bien que cela ne soit statiquement pas nécessaire, des tire-fort de stabilisation ont été tendus de manière provisoire avant le soudage des premières entretoises.

Pour permettre la pose parfaitement centrée des bracons sur les pieds d'arcs (caissons trapézoïdaux posés sur les appuis à pot, perpendiculaires à l'axe de l'ouvrage), des appareils de montage spécifiques ont été soudés en atelier à l'extrémité des bracons (fig. 18). De cette manière, l'appui définitif ne subit pas de rotation, même lorsque seules les palmes d'un côté de l'appui ont été posées.

2500 tonnes toute en finesse

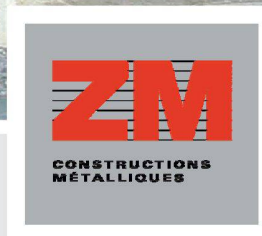
Le pont Léopold Sédar Senghor sera ouvert à la circulation au printemps 2010. Cet ouvrage mixte constitué de près de 2500 tonnes d'acier franchit la Loire par six travées en arcs surbaissés. Particulièrement fin et élégant, ce pont est un bel exemple de la manière dont l'architecture peut se servir de l'acier pour créer des formes harmonieuses et complexes. Cette complexité géométrique a été maîtrisée en imaginant des solutions simples et fiables tant en ce qui concerne la fabrication des pièces en atelier que les méthodes de montage et de contrôle.

Michel Thomann, dr ing. civil EPF
Zwahlen & Mayr SA, Ch. des Isles, CH – 1860 Aigle



Bâtiments
Ponts et passerelles

Halles et façades
Ouvrages spéciaux



ZWAHLEN&MAYR SA
Z.I. 2
CH - 1860 AIGLE
T + 41 24 488 46 46
F + 41 24 488 46 00
www.zwahlen.ch