

# CONSTRUCTION DU PONT RENAULT SUR LE GRAND BRAS DE LA SEINE À BOULOGNE-BILLANCOURT

Jean-Bernard DATRY, Sylvie EZRAN

Setec TPI

## 1. PRÉSENTATION DU PROJET

### 1.1. Historique

La Ville de Boulogne-Billancourt a retenu au mois de mai 2003, à l'issue d'un Concours d'Ingénierie et d'Architecture regroupant les architectes Zaha Hadid, Chris Wilkinson et Barto+Barto, le groupement SETEC TPI (mandataire) – Atelier BARANI pour réaliser la conception et la Maîtrise d'œuvre du nouveau pont sur le grand bras de la Seine, entre les nouveaux quartiers situés en rive droite et l'île Seguin.

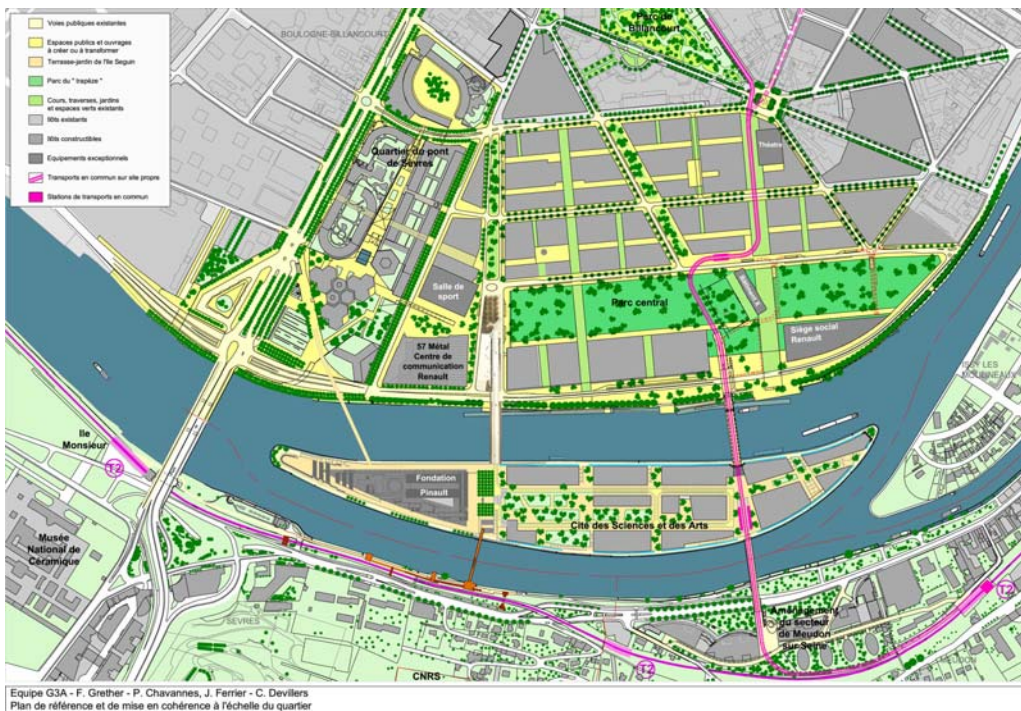


Figure 1 : Plan de masse

Ce pont relie l'île Seguin, en cours de cession par Renault à Boulogne Billancourt, et viendra compléter les ouvrages existants : le pont Daydé (1928) et le pont Siebert (1932) qui seront affectés aux circulations douces (piétons et cyclistes) et au tramway.

Le Projet a été conduit entre les mois de septembre 2004 et de février 2005. La consultation des Entreprises a eu lieu au printemps 2005. Le Marché de travaux a été attribué à Bouygues-Victor Buyck Steel Construction en septembre 2005 et l'ordre de service de réaliser les travaux a été délivré le 9/12/2005.

### 1.2. La Maîtrise d'Ouvrage

En phases d'Etudes Préliminaires Complémentaires et d'Avant Projet, le Maître d'Ouvrage était la Ville de Boulogne Billancourt, assisté de la société ICADE G3A qui était Maître d'Ouvrage délégué et mandataire. La mission d'assistance à la Maîtrise d'œuvre était assurée par Scetauroute, Infraplan pour les aspects de planning et le bureau d'études Alto pour les réseaux de Chauffage et de Froid Urbains.



Lors des phases de Projet, de Dossier de Consultation des Entreprises et de Travaux, par avenant daté du 14 septembre 2004, la Maîtrise d'Ouvrage est transférée à la SAEM Val de Seine Aménagement. L'assistance technique à la Maîtrise d'Ouvrage est assurée par ICADE G3A, Scetauroute et le bureau d'études Béture Environnement pour les réseaux de Froid et de Chauffage Urbains. La mission de contrôle technique est assurée par Socotec. La mission d'OPC de la ZAC est confiée à CICAD. La mission de CSPS est assurée par BECS en phases de Projet et de Dossier de Consultation des Entreprises, et par Normatest, puis Véritas en phase Travaux.

## 2. PARTICULARITÉS TECHNIQUES DU PROJET

### 2.1. Reconnaissances géotechniques

La campagne de reconnaissances géotechniques, effectuée au droit des appuis du pont, a mis en évidence un approfondissement du toit de la craie compacte par rapport aux hypothèses prises en compte lors de la définition du Programme de l'Ouvrage, notamment en rive droite :

Appuis	Programme de l'ouvrage Toit craie dure	Campagne Fondasol (2004) Toit craie compacte
Culée C0	+3.00m NGF	+1.00m NGF (moy compacte) -6.00m NGF (compacte)
Pile P1	+4.00m NGF	-4.00m NGF (très compacte)
Pile P2	+10.00m NGF	-4.00m NGF (moy compacte) -6.00m NGF (très compacte)
Culée C3	+10.00m NGF	-4.00m NGF (moy compacte) -6.00m NGF (très compacte)

La prise en compte des résultats de la campagne Fondasol a conduit à augmenter la longueur des fondations profondes en conséquence.

Appuis	Arase inférieure des pieux Projet
Culée C0	0.00m NGF
Pile P1	-5.00m NGF
Pile P2	-5.00m NGF Barrettes réalisées avec le Parking
Culée C3	-5.00m NGF Barrettes réalisées avec le Parking

Cette campagne géotechnique a également permis de déterminer la profondeur des palplanches constituant le batardeau sous P1, afin d'en assurer l'ancrage dans la craie imperméable.

### 2.2. Réseaux

Le Maître d'ouvrage a conduit une enquête réseaux auprès des concessionnaires. Une étude minutieuse des raccordements des réseaux tant en rive droite qu'en rive gauche, de leur mise en place et de leur entretien dans l'ouvrage a été effectuée préalablement à l'engagement des travaux. Les réseaux de chauffage urbain, de froid urbain, de gaz, d'électricité, de télécoms et réseaux et d'éclairage public de l'île Seguin sont mis en place par les concessionnaires au fur et à mesure de l'achèvement des tronçons. Des conventions sont à établir entre les différents partenaires pour définir notamment les conditions de réception de ces réseaux par les concessionnaires.

Les réseaux d'eaux usées, d'eau potable et de gaz ont été intégrés au Projet de l'ouvrage. Ils sont également réalisés par le constructeur du pont.

### 3. EXIGENCES ARCHITECTURALES

#### 3.1. Conception architecturale

Les séquences spatiales structurent l'architecture de l'ouvrage. Il est mince et effilé sur le cours, ramifié sur le quai, déployé sur la Seine. Si la surface ne laisse rien transparaître des efforts structurels, la sous-face les révèle, alors que son profil les rend lisibles dans le site.

Les codes de lecture habituels entre la structure d'un pont et son usage sont ici troublés et décalés par des situations particulières :

- En vue lointaine depuis les quais, les différences de niveau des circulations masquées par les garde-corps mettent en scène de façon spectaculaire le mouvement coloré des piétons, des cyclistes et des automobiles. Leurs silhouettes apparaissent dans leur intégralité, découpées dans le ciel au-dessus de l'extrados.
- L'ambivalence dans la définition du pont est certaine. Est-ce un pont-passerelle ou une passerelle-pont ? Sans doute les deux en fonction des périodes d'usage. Mais c'est aussi un pont industriel, au vu de la grande quantité de réseaux embarqués, véritable cordon ombilical de l'île.
- La sous-face, capitale pour un ouvrage urbain prend en compte et résume cette ambivalence. Elle a l'aspect d'un pont routier dans sa partie centrale alors que les structures latérales finement tendues vers les extrémités dessinent le passage progressif de la tôle blanche et massive aux tôles ajourées qui contiennent les réseaux, jusqu'aux planches de bois des rives circulées.

L'architecture globale du pont mixe et fusionne l'image d'un pont routier, d'un objet technique et d'une passerelle piétonne. Elle les décline de façons différentes lorsqu'elle frôle et touche l'espace urbain ou lorsqu'elle se projette dans l'espace naturel de ce quartier de Boulogne.

#### 3.2. Les entrées en terre

L'ouvrage a fait l'objet d'une étude architecturale minutieuse visant à définir l'itinéraire et l'insertion du tablier dans les berges de la Seine.

La culée de l'île s'inscrit dans la continuité du mur du quai. Les appareils d'appui sont protégés par un habillage démontable en éléments de tôle peinte tramés sur le principe du mur de quai et de teinte métallisée au choix de l'architecte. Le parement de la culée est réalisé par un autre marché, dont l'objet est la réalisation du pourtour de l'île.

La culée rive droite. Les trottoirs de la culée sont revêtus de pierre dure calcaire et sont en continuité des sols avec le cours Seguin. Les voiles de la culée sont réalisés en béton architectonique.

La pile principale située dans l'emprise de l'estacade est réalisée en béton brut.

Les voiles inclinés créés dans l'estacade autour de la pile P1 sont en béton brut. La partie supérieure reçoit un couronnement en béton. Les soutènements latéraux intègrent un dispositif d'éclairage de type projecteur encastré. Cette découpe du quai est bordée par un dispositif de garde corps dans l'épaisseur du sol type « emmarchements en saut de loup dont le raccord avec le voile incliné est à faire en concertation avec le concepteur en charge des aménagements de la zone.

La pile P2 est également en béton brut. Un soin particulier est apporté au raccord en partie basse avec le revêtement en pierre des futurs emmarchements sur le Cours Seguin menant au parking enterré.

Les bétons de ces ouvrages sont particulièrement soignés. L'aspect, les finitions, et la teinte de ces différents ouvrages sont le plus homogène possible, notamment au droit des reprises de bétonnage. Le béton est brut de décoffrage, sans enduit ni ragréage et de teinte claire. Les coffrages sont particulièrement soignés et calepinés (banches et écarteurs) pour obtenir une finition parfaitement lisse.

#### 3.3. Les accès

La structure des escaliers d'accès est constituée de trois PRS en acier métallisés à chaud et peint dans une teinte grise métallisée. Les marches et les paliers sont réalisés en lattes de bois de même essence que le platelage du pont. Les nez de marches présentent une bande antidérapante constituée d'une résine polymère sablée.

Un soin tout particulier est accordé au raccord avec les revêtements futur du cours Seguin pour l'accès AVAL et du quai pour l'accès AMONT en concertation avec les architectes et urbanistes en charge de l'opération.

L'ascenseur AMONT, côté quai, est habillé de tôles inox sur la face d'accès et de métal sous forme de panneaux constitués de fer en U galvanisés et peint comme les PRS des escaliers sur les trois autres faces.



L'ascenseur AVAL, côté parvis, est habillé de tôles inox sur la face comportant les portes également en inox, et ce sur toute la hauteur de la superstructure. Les trois autres faces sont constituées de panneaux de verre opalescent. La couverture de l'édicule ainsi que la cabine sont en vitrage.

### 3.4. Le tablier

En sous face, le caisson en tôle peinte ton clair est prolongé sous les trottoirs par des « capots » habillant les réseaux. Réalisés en tôle peinte de même teinte que le caisson, ces capots sont démontables et espacés les uns des autres suivant le rythme des garde-corps. Egalement décollés du caisson ils forment ainsi des plaques ou écailles suspendues qui se différencient sans ambiguïté de la masse du caisson.

Les gardes corps de la travée de rive sont constitués de poteaux en acier peint entretoisés, implantés suivant le rythme de 210cm de la structure du pont, d'une main courante en inox brossé et de filières en câbles d'acier inoxydables espacés de 15cm et tendus par des ridoirs. Ils suivent la pente du pont variant de 0 à 9,8%.

Les gardes corps de la travée située sur la Seine sont en bois et sont fixés en extrémité des encorbellements. Ils sont composés de poteaux d'acier peint de même teinte que la charpente métallique apparente, d'un remplissage horizontal en tasseaux bois dans la même essence que le platelage et d'une main courante également réalisée en bois de même essence.

Le trottoir haut le long de la chaussée, dans la continuité de celui de la travée rive droite, est en pierre dure de type calcaire de type « beige classico » finition grenailée

Le trottoir en contrebas est constitué d'un platelage bois. Les trottoirs hauts et bas sont séparés par des gradins en platelage bois de même essence qui disparaissent progressivement lorsque les deux niveaux se rejoignent.

Le Maître d'oeuvre a établi, préalablement à la consultation des entreprises, un prototype d'étude du platelage bois afin de comparer les essences de bois utilisables : chêne / tali / courbaril / bangkirai / maçaranduba./ teck. Le Maître d'ouvrage a choisi, après examen de quelques mois de vieillissement sur le site le Tali. Les planches de bois du platelage de la circulation basse, de par leur finition brut de sciage, leur largeur, et la mise en place d'une bande de résine polymère antidérapante, permettent un confort d'utilisation face au phénomène de glissance

La chaussée en revêtement clair est bordée de trottoir en pierre dure calcaire.

La passerelle amont est équipée de deux garde-corps verticaux constitués de poteaux métallique et d'un remplissage en bois. Les garde-corps sont équipés de mains courantes fixées sur lisse haute métallique

### 3.5. Eclairage

Balisage des voies routières et des trottoirs le long de la chaussée : il est réalisé au moyen de bornes éclairantes espacées de 140cm permettant un éclairage rasant côté chaussée et côté trottoir.

Eclairage de la circulation basse : il se fait à partir de la main courante par un couple d'appareils de type appareils à encastrer équipés de leds à chaque montant vertical du garde-corps selon la trame de 210cm de la structure du pont.

Orientés vers le platelage bois il ne sont pas perceptibles de l'extérieur et ne participent pas à l'éclairage de mise en valeur.

Eclairage de la pile P1 : l'éclairage de mise en valeur du pont se fait à partir de la pile P1 au moyen d'appareils équipés de lampe de type iodures métalliques, encastrés dans les voiles bétons autour de la pile.

Le tablier reçoit un éclairage indirect par une série de cinq appareils orientés vers la surface de l'eau proche de la pile et par une autre série de cinq autres appareils orientés vers un point plus éloigné au centre du fleuve.

L'ensemble de ces dispositions concourt à mettre en valeur la silhouette du pont. La courbe de l'extrados est ponctuée de points lumineux constitués par les bornes et la courbe de l'intrados en métal peint en blanc reçoit le reflet de la seine éclairée depuis les rives.

## 4. DESCRIPTION TECHNIQUE DE L'OUVRAGE

### 4.1. Données géométriques et fonctionnelles

#### 4.1.1. Tracé en plan

Le tracé en plan de l'ouvrage est rectiligne, de gisement 41,3451 grades.

#### 4.1.2. Profil en long

Le profil en long respecte les valeurs maximales et minimales en angle rentant et saillant imposé par les normes pour une vitesse de référence de 60 km/H.

### 4.1.3. Profil en travers

Le profil en travers permet le passage de la circulation automobile sur deux voies, des cyclistes et des piétons de chaque côté de la chaussée.

Les largeurs fonctionnelles sont les suivantes :

- sur les travées 1 et 2
  - trottoirs bas 2 x 2,30 m
  - emmarchements 2 x 1,20 m
  - trottoirs hauts, de part et d'autre de la chaussée 2 x 3,20 m
  - chaussée 2 x 3,00 m
  
- sur les travées 2 et 3
  - trottoirs 2 x 2,30 m
  - chaussée 2 x 3,00m

La largeur totale de l'ouvrage est donc variable. Elle varie de 19,40 m au droit de la culée C0, à 10,60 m au-delà de la file 63.

Le devers de la voie routière est de 2 % vers l'extérieur. La pente des trottoirs hauts est de 1 %. Les trottoirs bois sont horizontaux.

### 4.1.4. Gabarit routier

Le gabarit de la RD 1, quai de Stalingrad, est de 4,90 m y compris revanche de 0,15 m, mesuré perpendiculairement au plan de la chaussée.

### 4.1.5. Gabarit fluvial

L'intrados de l'ouvrage doit être disposé à une cote supérieure à 34,80 m, tant en phase de construction qu'en phase définitive.

La hauteur de la passe navigable varie donc de 6.35 par rapport aux PHEN à 8.05m par rapport à la retenue normale (RN).

## 4.2. Données générales

### 4.2.1. Données hydrauliques

L'étude de l'incidence des batardeaux et des palées provisoires sur le niveau de crue de la Seine a été réalisée par le B.C.E.O.M. Les résultats sont consignés dans le « dossier de demande d'autorisation au titre des articles L214-1 à L214-6 du code de l'environnement » d'avril 2004 dans le volume intitulé « Analyse de l'incidence hydraulique des ouvrages provisoires nécessaires à la construction du nouveau pont ».

Les niveaux à prendre en compte sont les suivants :

- plus basses eaux navigables : 26,25 NGF
- retenue normale : 26,75 NGF
- plus hautes eaux navigables : 28,45 NGF
- crue centennale : 31,55 NGF
- crue chantier : 29,35 NGF

### 4.2.2. Conditions de navigation

Le grand bras de la Seine est utilisé pour la circulation des péniches de l'aval vers l'amont. Le chenal de navigation de 60 m est centré sur le grand bras. Il présente un gabarit fixé à 34,80 m NGF. L'implantation du gabarit en plan figure sur la vue en plan de l'ouvrage.

Toute implantation de palées provisoires en Seine et leur système de protection doit recevoir l'accord préalable du Service de la Navigation de la Seine. Les ouvrages provisoires doivent être protégés des chocs de bateau par des moyens appropriés, ducs d'Albe et glissières, disposés en amont et en aval des ouvrages, le sens de circulation des péniches étant dans le sens Rouen – Paris.

### 4.2.3. Déviation de la RD1

#### *Déviaton de la chaussée*

La construction de l'ouvrage de franchissement de la Seine, entre Boulogne-Billancourt et l'île Seguin, nécessite la déviation d'une portion de la RD1 afin de libérer l'emprise nécessaire à l'exécution de la fouille de la pile P1 de l'ouvrage, aux installations chantier et leur accès par la RD1.



La déviation de la RD1 emprunte une portion des terrains dits « du trapèze » Renault, en limite d'emprise. Les caractéristiques géométriques de la déviation doivent respecter les valeurs maximales et minimales imposées par les normes.

### Réseaux des Concessionnaires sous la RD1

Les travaux de réalisation de l'ouvrage ont des interférences avec les réseaux des concessionnaires existants sous la RD1.

On recense actuellement dans l'emprise des travaux, les réseaux concessionnaires suivants :

- Réseaux de récupération des Eaux Pluviales de la RD1 et collecteur d'égout principal SEVESC
- Réseaux d'Adduction d'Eau Potable CGE Ø800, Ø500, Ø100 AEP et Ø100 protection incendie
- Réseaux EDF HT, MT, et BT
- Réseaux Fibre optique « Neuf Télécom »
- Réseaux GDF Ø110 MPB, Ø200 Renault, Ø200 GDF et Ø100 HP ;
- Réseau éclairage public de la RD1 ;
- Réseau SITER ;
- Réseaux Renault ;

La présence de ces réseaux nécessite l'intervention d'entreprises extérieures qui réalisent les travaux de déviations des réseaux suivants :

- Réseaux EDF HT, MT et BT ;
- Réseaux SITER.

La déviation de la RD1 et des réseaux implique au préalable les travaux suivants :

- La reconstitution de la chaussée ou du trottoir, de constitution et de caractéristiques au moins équivalentes à l'existant, pour les tranchées de réseaux réalisés par des entreprises extérieures ;
- La dépose de l'éclairage existant sur l'emprise des travaux ;
- La fourniture et la pose d'un éclairage provisoire le long de la déviation de la RD1 pour le maintien en exploitation de cet axe ;
- La démolition du regard et de la galerie d'accès à l'ovoïde SEVESC situé au droit de la fouille de la pile P1 ;
- La réalisation d'un nouveau regard et d'une nouvelle galerie d'accès à l'ovoïde SEVESC en dehors de l'emprise des travaux.

#### 4.2.4. Conditions climatiques et d'environnement

##### Classe d'exposition à l'environnement climatique

Les classes d'exposition à l'environnement climatique auxquels sont soumises les différentes parties en béton de l'ouvrage sont précisées ci-dessous, conformément à la définition de la norme EN 206-1.

- Bétons enterrés de plus d'un mètre

Parties d'ouvrages	Classe d'exposition
Semelles de fondation : accès amont, culée C0	XA2, XC2, XD2, XF3 (F)
Fondations profondes : tous ouvrages	XA2, XC1, XD2, XF3 (F)
Voiles contre terre : culée C0	XA2, XC2, XD2, XF3 (F)

- Bétons totalement immergés

Parties d'ouvrages	Classe d'exposition
Semelles de fondation, embase	XA2, XC1, XD2, XF3 (F)
Béton immergé pour fondation pile P1	XA2, XC1, XD2, XF3 (F)

- Bétons partiellement immergés

Parties d'ouvrages	Classe d'exposition
Superstructures : Pile P1 et culée C0	XA2, XC4, XD1, XF1 (F)

- Bétons sans contact avec le sol, non immergés, même partiellement, et soumis aux eaux de ruissellement de chaussée

Parties d'ouvrages	Classe d'exposition
Longrine des dispositifs de retenue, bordures de trottoir	XA2, XC2, XD2, XF4 (F)

- Bétons sans contact avec le sol, non immergés, même partiellement, et non soumis aux eaux de ruissellement de chaussée

Parties d'ouvrages	Classe d'exposition
Culée C3, Pile P2	XA2, XC2, XD2, XF2 (F)

#### Niveau de prévention vis-à-vis des risques liés à l'Alcali-Réaction

Il est fait référence ci-après aux notations et aux dispositions figurant dans le document « Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction » du LCPC de juin 1994, officialisé par la Circulaire du SETRA du 24 janvier 1995.

Le niveau de prévention vis-à-vis des risques liés à l'alcali-réaction est le niveau C.

Ce niveau de prévention s'applique à toutes les parties principales de l'ouvrage, à l'exception des pièces facilement remplaçables pour lequel le niveau requis est le niveau B : bordures en béton le long de la chaussée.

### 4.3. Description de l'ouvrage terminé

#### 4.3.1. Conception générale

L'ouvrage de franchissement du grand bras de la Seine est un ouvrage à trois travées. Il est appuyé sur une culée inscrite dans le quai haut de l'île Seguin, une pile située en rive droite de la Seine, en bordure du quai Stalingrad, une pile et une culée situées au droit d'un parking de 600 places environ dont les phases de réalisation sont simultanées avec le pont. La structure porteuse est constituée d'un caisson de hauteur variable, à trois travées dissymétriques, supportant la chaussée et la piste cyclable, les trottoirs étant situés en contrebas par rapport à la chaussée. La hauteur du caisson porteur, fine du côté Boulogne, augmente progressivement en allant vers l'appui médian, puis s'affine à nouveau sur le socle de l'île, sur lequel il vient affleurer.

La répartition des travées est la suivante :

- 96,60 m au-dessus de la Seine,
- 67,20 m au-dessus du quai Stalingrad,
- 41,80 m pour l'ouvrage de raccordement,

La longueur totale est 205,60 m.



Figure 2 : Coupe type du tablier



Afin de dégager le gabarit de navigation tout en permettant l'inscription d'une hauteur de section suffisante dans la section d'appui, le profil en long de la chaussée routière est constitué d'une parabole ( $R = 1670,311 \text{ m}$ ) dont la tangente horizontale est située sur la file 46 et la pente maximale, en file 0, est de 3,4 %. Et pour respecter les pentes maximales acceptables par les PMR, le profil en long du trottoir, situé en contrebas de la chaussée, est constitué d'une parabole ( $R = 2860,775 \text{ m}$ ) ayant son sommet sur la même file 46 et dont la pente maximale est de 3,40 %.

L'intrados de la travée principale est calé au dessus du gabarit de navigation. Il est constitué de deux droites et d'une parabole  $R = 1202 \text{ m}$ .

Ainsi, la hauteur du tablier varie de 1,65 m, à l'appui sur l'Île Seguin, à 4,00 m sur la file 46. La descente côté Boulogne s'effectue, au niveau de la chaussée, par une parabole ( $R = 787,589 \text{ m}$ ) prolongée par une droite à 9,8 %.

Le trottoir bas est :

- prolongé jusqu'à l'ascenseurs et un escalier, situés au voisinage de la file 64 à l'aval ; cet accès est situé sur le parvis, en vis-à-vis du bâtiment de communication Renault (57 Métal).
- interrompu en amont, au droit du quai Stalingrad, sur lequel il descend par l'intermédiaire d'une passerelle parallèle au quai située entre les files 48 et 49, d'un escalier et d'un ascenseur.

Le trottoir haut, situé de part et d'autre de la chaussée, se prolonge sur la rampe jusqu'au cours de l'Île Seguin par laquelle il permet :

- l'accès des cyclistes,
- l'accès direct des piétons,
- le passage de sécurité nécessaire aux usagers de la voie routière.

L'accès des piétons, cyclistes et personnes à mobilité réduite est donc simultanément possible.

Le profil en travers est symétrique sur le fleuve et à l'arrivée sur le parvis de l'Île Seguin, afin de donner une largeur plus généreuse aux circulations douces (piétons et cyclistes) sans privilégier l'amont ou l'aval de l'Île. Au-delà du quai Stalingrad, le profil en travers dissymétrique permet la liaison avec le 57 Métal et la liaison avec le quartier du pont de Sèvres.

#### 4.3.2. Tablier

Le calage de l'intrados et de l'extrados résulte d'une analyse méticuleuse des contraintes de profil en long et des gabarits à ménager sous l'ouvrage. La hauteur de la section est variable, la loi de variation étant ainsi compatible avec la variation des sollicitations. De 1,65 m à l'appui sur l'Île Seguin (culée C0) elle s'épaissit à 4,00 m au niveau de la berge et s'amincit à nouveau à 2,05 m au niveau de l'appui P2 (file 78). Le profil reste ensuite constant jusqu'à la culée C3.

La section transversale est un caisson de largeur constante dont les encorbellements sont variables en fonction des différentes séquences de l'ouvrage.

La largeur entre âmes du caisson est de 6,40 m, la largeur de la table supérieure étant portée à 12,40 m pour recevoir, de part et d'autre, l'ancrage des bordures de béton et des bornes de sécurité et les trottoirs hauts. Les âmes sont verticales et la géométrie de l'intrados est en arc de cercle de rayon variable.

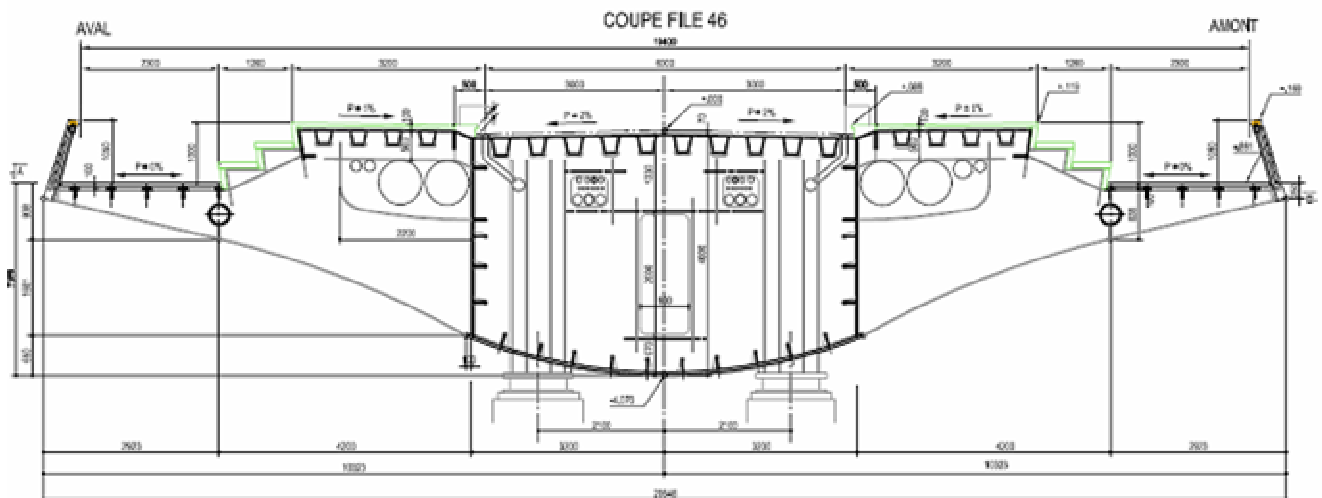


Figure 3 : Coupe transversale sur appui P1



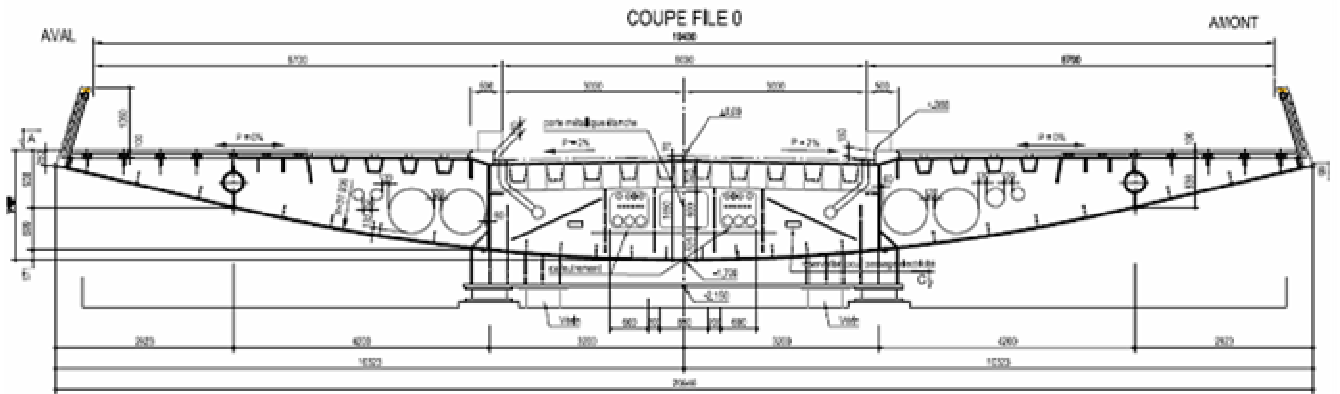


Figure 4 : Coupe sur appui C0

La courbure de la tôle de fond augmente progressivement de l'appui C0 à l'appui P1, puis diminue à nouveau, selon une loi de variation identique, de P1 à P2. Au-delà de P2, la géométrie du caisson porteur est constante jusqu'à la culée C3. Le tracé des sections a donné lieu à un travail géométrique méticuleux inspiré de l'architecture navale.

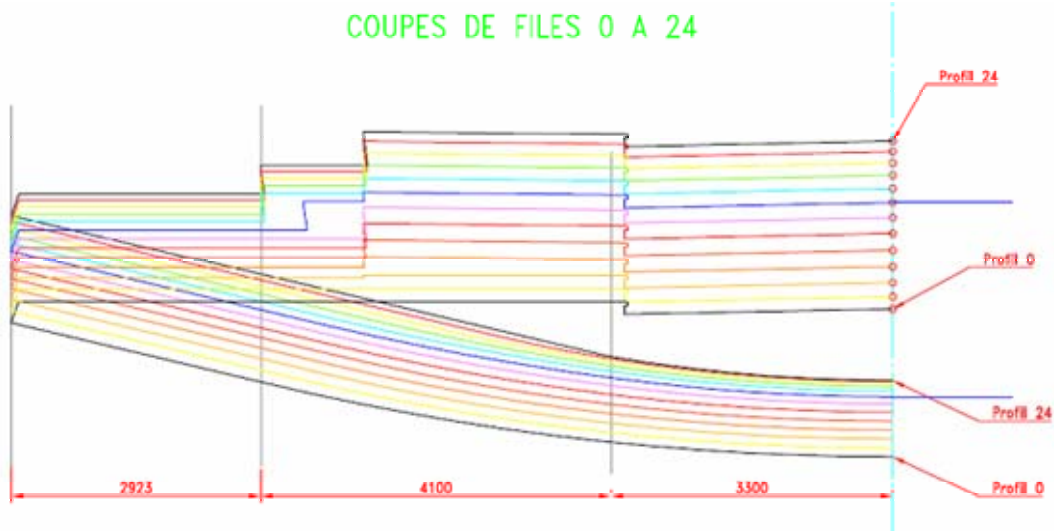


Figure 5 : Evolution de la géométrie des sections des files à 24

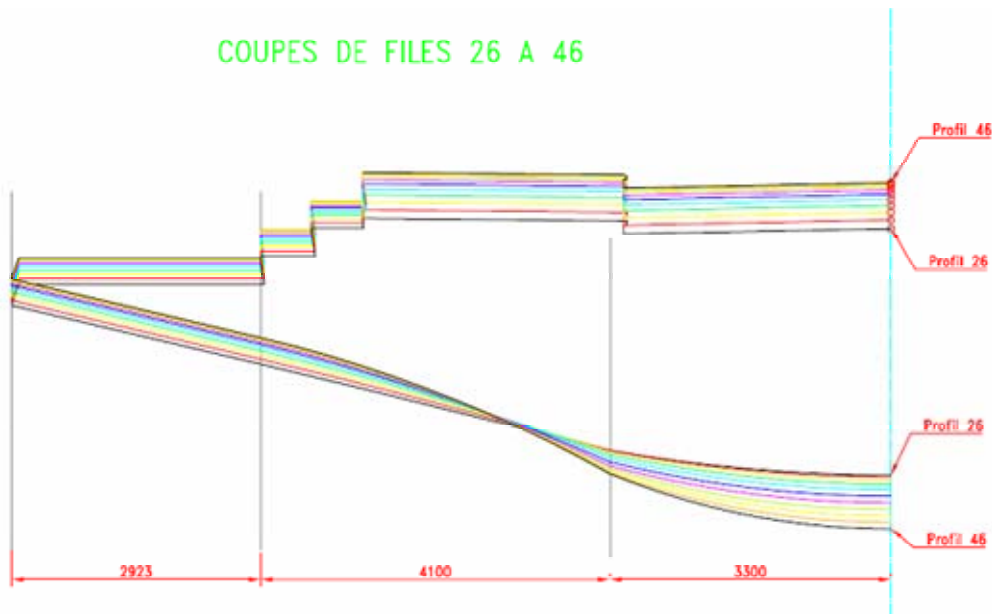


Figure 6 : Evolution de la géométrie des sections de 26 à 46



Le raidissage intérieur du caisson est réalisé par :

- des diaphragmes, espacés tous les 4,20 m, constitués de tôles planes raidies de 12 mm d'épaisseur,
- de diagonales, en V inversé, constituées d'UAP 200 assurant la rigidité en torsion,
- de raidisseurs en plats, perpendiculaires à l'intrados, destinés à assurer la stabilité de la tôle de fond. Le choix des plats permet un découpage aisé compte tenu de la géométrie finale de l'intrados : double courbure du profil, contre flèches,
- de raidisseurs longitudinaux des âmes, en plat ou en augets, destinés à assurer leur stabilité en service ou en construction.

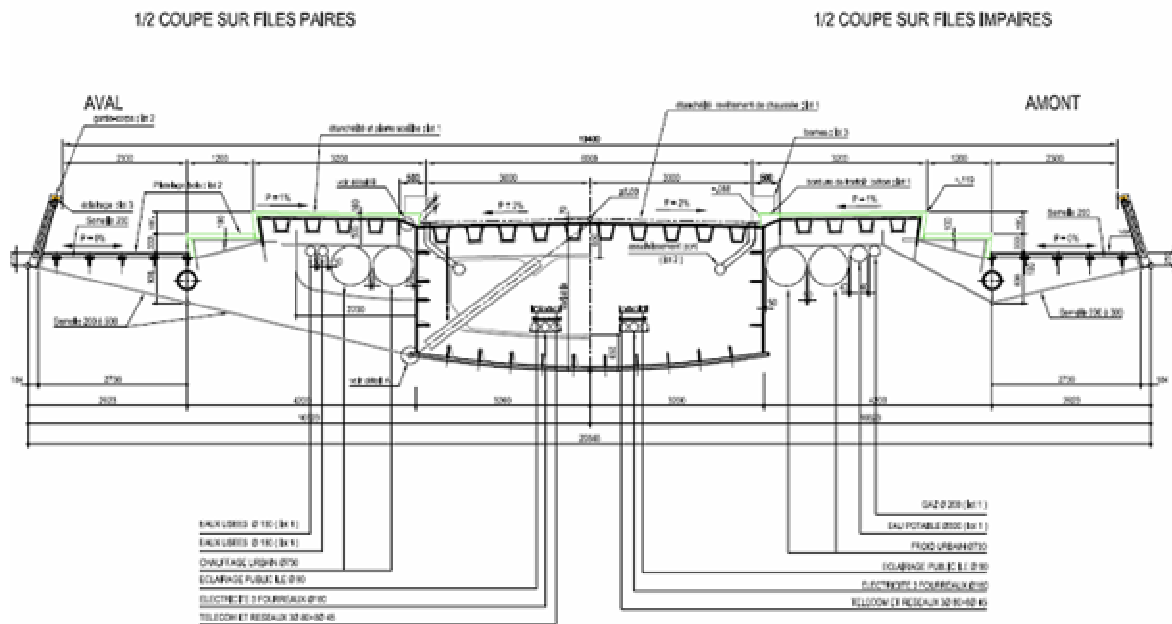


Figure 7 : Coupe type sur la travée 1

Le platelage supérieur est constitué d'une dalle orthotrope. L'épaisseur de la tôle supérieure varie de 14 à 26 mm sous la chaussée et les trottoirs. L'épaisseur des augets est constante et égale à 8 mm sous la chaussée et les trottoirs. La tôle de fond, dont le rayon varie linéairement avec l'abscisse, est constituée d'une tôle d'épaisseur variable selon les travées de 14 mm à 60 mm. Les épaisseurs des âmes sont égales à 18 mm en section courante. Les âmes sont plus épaisses à l'arrivée sur la culée C0 où la hauteur de l'ouvrage n'est plus que de 1,65 m.



Photo 1 : Vue (retournée) du raidissage interne du tablier

Les diaphragmes sont renforcés au droit des appuis définitifs. Ils sont constitués :

- De caissons aux extrémités C0 et C3 afin de permettre le déplacement de la réaction d'appui par rapport à la section d'extrémité. Ce caisson renforcé permet également de transférer les charges des appuis sous les âmes en C3 où il a été nécessaire de les écarter pour éviter le décollement d'appui sous les sollicitations de torsion.
- Des diaphragmes raidis en P1 et P2. L'opération de vérinage pour changer les appareils d'appui à pot d'élastomère peut être considérée comme exceptionnelle. Un chevêtre en acier, appuyé sur les semelles de fondation de ces appuis, permettra la mise en place des vérins sous les âmes ou sous les diaphragmes. Les appuis de béton sont donc calculés pour recevoir ces charges occasionnelles.

Les encorbellements latéraux sont de deux types :

- Toutes les files paires, des poutres primaires en profil reconstitué soudé épousent le contour de l'intrados et de l'extrados de l'ouvrage. Le tracé de ces encorbellements tient compte de la variation de hauteur du caisson, de l'embranchement et du tracé des réseaux.
- Toutes les files impaires, une poutraison secondaire appuyée sur une poutre tubulaire située au pied des emmarchements et sur l'âme du caisson permet l'appui du platelage bas, des emmarchements de bois et des augets sous dalle orthotrope, d'une hauteur réduite à 230 mm, et dont la portée est alors de 2,10 m.



*Photo 2 : Variation des larges encorbellements*

Dans la rampe d'accès située entre P2 et C3, l'encorbellement latéral est constitué de profils identiques dont, à raison d'un sur deux, l'un est encastré sur les diaphragmes espacés de 4,20 m et l'autre, simplement appuyé sur la poutre de rive et l'âme des caissons.

La géométrie de l'intrados en travée de rive est donnée par des arceaux non structurels, destinés à supporter la tôle d'habillage qui est démontable, toutes les dispositions étant prises pour que les arceaux ne participent pas à la flexion locale des encorbellements.

Les encorbellements latéraux sont revêtus en partie basse et sur les emmarchements par un platelage bois. Ce platelage est posé longitudinalement dans l'embranchement et transversalement sur le trottoir bas.

Le trottoir haut est revêtu de dalles de calcaire, scellées sur le platelage qui est protégé par une résine, de type BAYTEC ou similaire. Ce trottoir haut présente une pente de 1 % dirigée vers la chaussée pour permettre l'écoulement des eaux.

La circulation d'une nacelle de type ARC 160/180 est possible depuis le trottoir haut. Aussi, les réseaux situés sous les encorbellements sont accessibles depuis l'extérieur. Ce type de nacelle pourra être utilisé également pour les visites périodiques de l'intrados du tablier.



### 4.3.3. Dispositifs d'appui du tablier sur les piles

Le tablier repose sur les piles par l'intermédiaire d'appareils d'appui à pots d'élastomère. Les conditions de déplacement sont imposées par le schéma de dilatation retenu pour l'ouvrage.

Appuis	Mouvements	
	longitudinaux	transversaux
C0 – Amont	libre	fixe
C0 – Aval	libre	libre
P1 – Amont	fixe	fixe
P1 – Aval	libre	libre
P2 – unique	libre	fixe
C3 – Amont	libre	fixe
C3 – Aval	libre	libre

Les dimensions des plaques de glissement sont adaptées aux déplacements du tablier sous l'enveloppe des déplacements obtenus pour chacun des cas de charges.

### 4.3.4. Culée C0

#### Description

La culée C0 est une boîte creuse, appuyée sur des fondations profondes. Elle est constituée d'une semelle en U, de poteaux, d'un chevêtre, d'un mur arrière garde grève et de deux voiles latéraux de forme trapézoïdale. En face avant, elle reçoit un mur de béton préfabriqué réalisé en continuité du mur de quai. Un plancher nervuré couvre l'espace situé entre le talus arrière et le chevêtre. Cette culée est visitable depuis le mur de berges. L'espace entre le tablier et la culée est fermé par une tôle métallique, galvanisée et peinte, appuyée sur des supports en profilés.

A l'intérieur de la culée, sont prévus les passages pour l'ensemble des réseaux et leurs dispositifs de suspension. Le sommier est directement accessible depuis une passerelle métallique, permettant ainsi l'accès au tablier, aux appareils d'appui et aux descentes d'eau. Un escalier en béton armé adossé au talus intérieur, permet l'accès à la berme haute et à la passerelle d'entretien.

Le plancher haut de la culée est recouvert d'une étanchéité. Cette dernière reçoit une protection provisoire, en attendant la mise en œuvre du revêtement définitif du parvis de l'île.

Les fondations sont profondes et ancrées dans la craie saine. Les sondages réalisés à l'emplacement de la culée C0 laissant penser que le toit de la craie saine est rencontré vers la cote 1 m NGF. Les pieux sont ancrés d'au moins un diamètre dans le substratum.

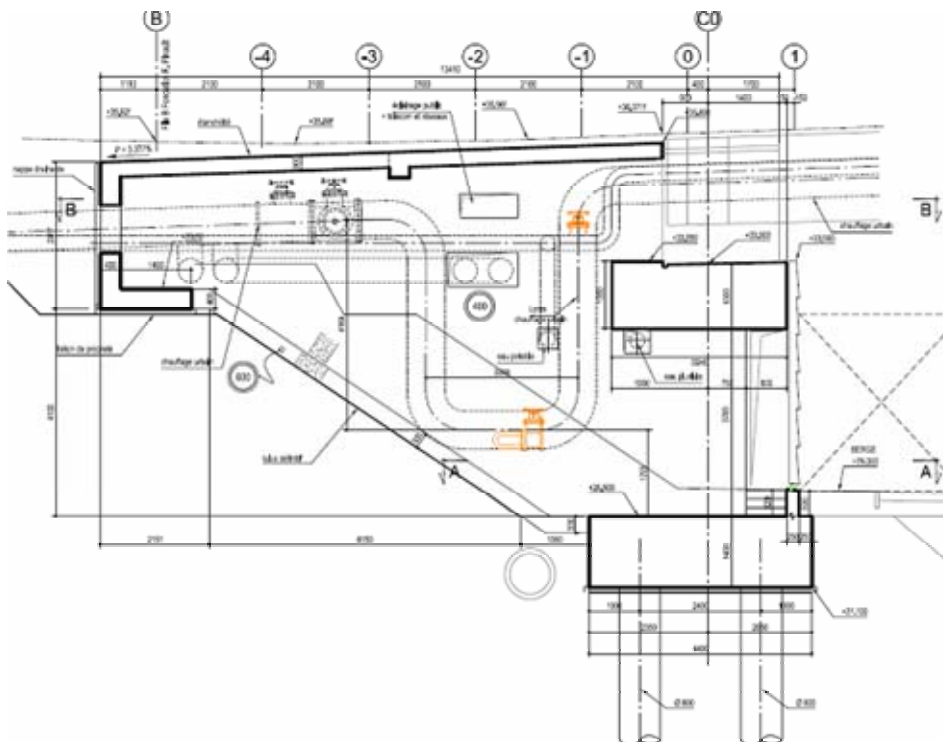


Figure 8 : Culée C0

#### 4.3.5. Pile P1

Située en rive du quai de Stalingrad, cette pile est constituée de deux fûts trapézoïdaux en béton armé, reposant sur un chevêtre de liaison, puis une semelle de fondation.

L'appui P1 repose sur 4 pieux forés de gros diamètre, ancrés dans la craie saine.

En rive de la semelle, des murs de soutènement soutiennent les terres sur trois côtés et constituent une engravure dans le quai destinée à mettre en valeur l'appui principal du pont.

Les voiles d'appui reçoivent en tête les appareils d'appui à pots d'élastomère.

Le vérinage du tablier est de préférence réalisé sous les âmes du pont. Les appuis définitifs étant situés dans l'emprise du caisson, ils ne sont pas un obstacle à la mise en place des dispositifs de levage qui sont situés sous les âmes et dont les charpentes provisoires prennent appui sur la semelle de fondation.

Compte tenu de la proximité du fleuve, la réalisation des pieux, de la semelle et des fûts se fait à l'abri d'un batardeau de palplanches ancré dans la craie de transition.

Préalablement à la construction de cette protection, la démolition de l'estacade n° 3, de l'abri anti-aérien, des tirants et des massifs d'ancrages situés dans l'emprise du batardeau est nécessaire. Pour effectuer ces travaux, il est nécessaire de dévier au préalable le quai de Stalingrad et les réseaux existants.



*Photo 3 : Pile P1*

#### 4.3.6. Pile P2

La pile P2 est une simple colonne, munie en tête d'un appareil d'appui à pot d'élastomère. Cet appareil permet le glissement du pont dans le sens longitudinal. Il est fixé dans le sens transversal.

La fondation de cet appui est liée au projet de parking. Les réactions horizontales apportées par le tablier sont reprises par les planchers du parking. Les barrettes de fondation sont réalisées dans le cadre des travaux du Parking.

La semelle de fondation est solidaire de la couverture du parking et reçoit, en périphérie, les coupleurs destinés à recevoir les aciers de liaison.

La mise au point de cet appui demande donc que soit connu le projet définitif du parking et du phasage de ses travaux par rapport aux travaux de fondations du pont.

Les vérins nécessaires au relevage du pont prennent appui sur la semelle de fondation, par l'intermédiaire d'un chevêtre en acier. Ceux-ci peuvent être positionnés sous les âmes ou sous le diaphragme d'appui.

#### 4.3.7. Culée C3

Cette culée est une boîte rectangulaire creuse appuyée sur des files de barrettes, qui sont réalisées dans le cadre des travaux du Parking. Les files de barrettes ont été aménagées pour permettre leur inscription dans une trame de parking. La longueur et le nivellement ont été adaptés pour permettre l'inscription de la partie supérieure dans le projet de parvis.

La culée comprend :

- en face avant, un mur de front, percé par l'entrée du parking,
- de part et d'autre du passage central, deux galeries recevant les différents réseaux humides et permettant :
  - leur séparation et leur distribution sous la voirie,
  - la mise en place des lyres de dilatation des tuyaux d'eau surchauffée et d'eau glacée
- une galerie de visite et d'entretien permettant l'accès au tablier et aux appareils d'appui.
- un passage central par lequel transite les réseaux secs.

L'ensemble est réalisé en voiles de béton armé. Les ouvrages de serrurerie sont réalisés en acier galvanisé.



La construction de la culée comprend la fourniture et la mise en place de coupleurs, destinés à permettre le raccordement des structures aux planchers du parking, qui reprennent les efforts horizontaux et l'escalier extérieur. Le couronnement des barrettes est réalisé jusqu'à une reprise de bétonnage verticale, avec aciers longitudinaux en attente des structures du parking. Le remblaiement en arrière de la culée sur la portion de dalle de couverture du parking est réalisé après les travaux d'étanchéité, la pose des réseaux. Les dispositions de détail intègrent les dispositions retenues par les concessionnaires pour assurer la dilatation et le raccordement des réseaux.

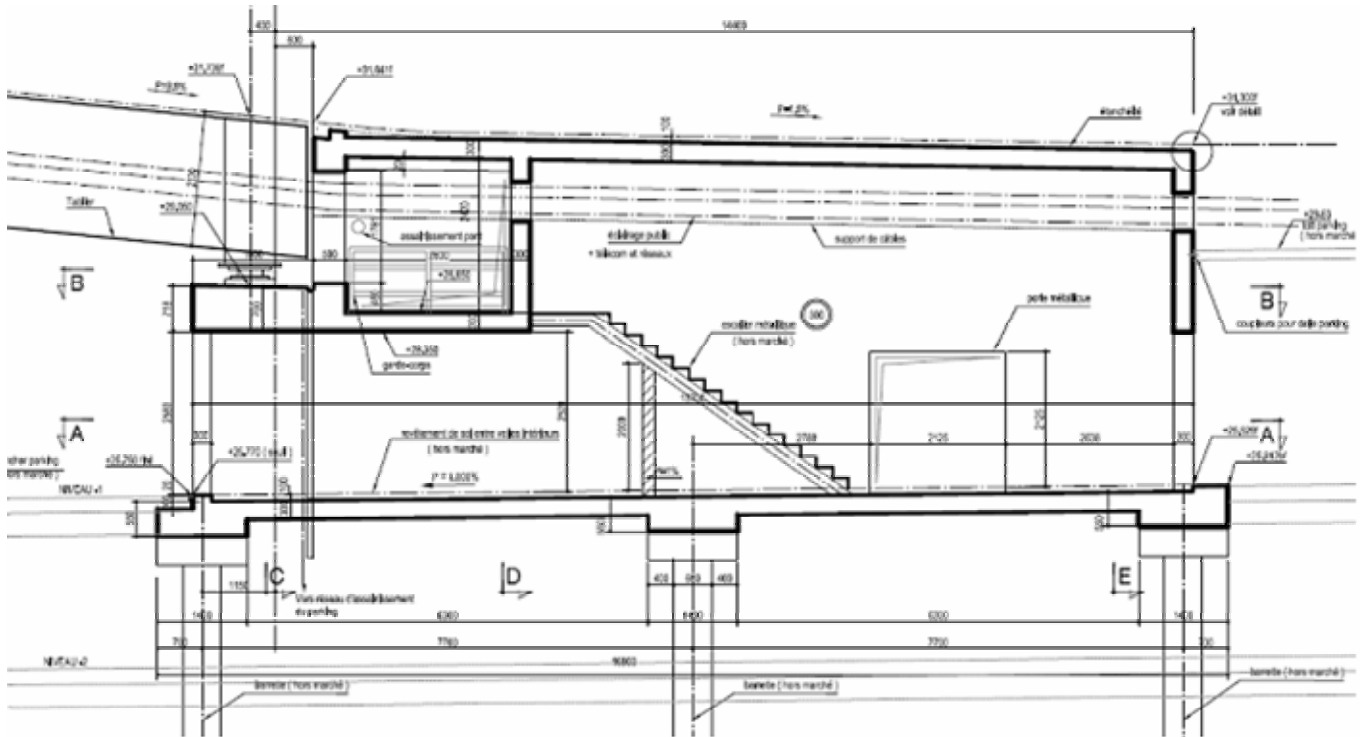


Figure 9 : Culée C3

#### 4.3.8. Équipements de l'ouvrage d'art

##### Chaussée

Elle est revêtue d'une étanchéité épaisse de 7 cm, compatible avec les dalles orthotropes, selon un système agréé par le SETRA. Les granulats sont choisis de façon à obtenir une couleur claire.

##### Trottoirs

Les trottoirs hauts de part et d'autre de la chaussée sont revêtus de dalles de calcaire scellées au mortier sur la tôle de platelage.

Les trottoirs bas et les gradins sont réalisés en bois. Parallèlement aux études de projet et au DCE, le Maître d'Ouvrage a fait réaliser un prototype de platelage bois. Ce prototype a permis de choisir le Tali parmi les essences suivantes qui ont une bonne tenue à l'usure :

- Chêne,
- Tali,
- Maçaranduba,
- Courbaril (Jatoba),
- Bangkirai,
- Teck.



Photo 4 : Les superstructures en cours de montage

### Bornes

La chaussée est séparée de trottoirs par une bordure en béton, ton pierre, sur laquelle sont fixées des bornes en fonte moulée recevant le balisage longitudinal de la chaussée et des trottoirs hauts. Elles constituent le guidage optique et physique de la chaussée.

Ces bornes sont posées au pas de 2,10 m pour éviter le franchissement occasionnel d'un véhicule. Leur résistance et leur ancrage sont déterminés pour un choc de 100 kN appliqué à 0,40 m de la surface de la chaussée.

### Garde-corps

Le garde-corps latéral est constitué de poteaux d'acier, fixés directement en bout des encorbellements au pas de 2,10 m. La main courante et la face inclinée sont réalisées en bois, dans la même essence que le platelage. En partie haute et sous la main courante, le garde-corps reçoit l'appareil d'éclairage des trottoirs bas.

Le garde-corps des travées de rive, situé de part et d'autre du trottoir haut, est constitué de poteaux en acier entretoisés, d'une main courante en tube d'acier inoxydable et de filières en câbles d'acier inoxydable tendu par des ridoirs.

### 4.3.9. Réseaux sous ouvrage

Le pont sur le grand bras de la Seine assure le passage de réseaux devant à terme alimenter l'île Seguin et dont la nomenclature figure ci-dessous :

Type de réseau	Diamètre	Nombre	Commentaires
Eau potable	DN 250	1	PN 16 bars
Assainissement eaux usées	DN 150	2	Refoulement PN 10 bars
Gaz	Fourreau Ø200	1	Fourreau positionné à l'extérieur du caisson.
Chauffage urbain	Ø 400	2	Conduites Ø273 mm calorifugées
Froid urbain	Ø 560	2	Conduites Ø457 mm calorifugées
Electricité HTA	Fourreaux Ø 160	6	
Télécoms et réseaux	Fourreaux Ø 80 et Ø45	6 Ø 80 et 12 Ø 45	
Eclairage public de l'île	Fourreau Ø90	2	

Un certain nombre de ces réseaux doit être opérationnel dès la livraison de l'ouvrage. Ils sont donc embarqués au fur et à mesure de la construction des tronçons de tablier, et raccordés dès achèvement des opérations de mise en place du tablier.



*Photo 5 : Réseaux embarqués sous le tablier*

#### 4.3.10. Eclairage de l'ouvrage

L'éclairage à mettre en œuvre permet d'assurer les fonctionnalités suivantes :

- le balisage des chaussées circulées et des trottoirs le long de la chaussée,
- l'éclairage des trottoirs en surlargeur,
- l'éclairage des marches,
- l'éclairage de l'accès amont :
  - la plate-forme d'accès située devant l'ascenseur,
  - l'escalier,
  - la passerelle.
- l'éclairage de l'accès aval :
  - la plate-forme d'accès aval située en extrémité de tablier et d'escalier,
  - la zone entre les deux ascenseurs.
- l'éclairage sur la pile P1,
- l'éclairage fonctionnel
  - éclairage intérieur du pont,
  - éclairage des culées C0 et C3.

L'éclairage est de couleur blanche. Les critères photométriques concernant les trottoirs et les voies circulées à respecter sont les suivants :

- Trottoirs en surlargeur (espaces piétonniers) :
  - Eclairage moyen Emoy après dépréciation de 10 à 15 lux,
  - Pas de critère d'uniformité.
- Trottoirs le long de la chaussée (espaces piétonniers) :
  - Eclairage moyen Emoy après dépréciation de 10 à 15 lux,
  - Uniformité générale d'éclairage  $U_{oe} \geq 0,4$ .
- Chaussée (pour une voie) :
  - Luminance moyenne Lmoy après dépréciation de 1,5 à 2  $cd/m^2$
  - Uniformité générale de luminance  $U_{ol} \geq 0,2$
  - Uniformité longitudinale de luminance  $U_L \geq 0,6$
  - Eblouissement d'incapacité  $T_i \leq 10$



### *Balissage des voies routières et des trottoirs le long de la chaussée*

Ce balissage, permettant d'éclairer à la fois la chaussée et les trottoirs le long de cette chaussée, est rasant et est réalisé par des bornes cylindriques en bordure de trottoir.

L'orientation de l'appareil est définie pour obtenir le meilleur compromis de respect des critères d'éclairage et du contrôle d'éblouissement exposé précédemment.

Chaque borne est composée de trois parties :

- un puits de lumière comprenant un projecteur équipé d'une lampe de type iodures métalliques d'une puissance de 35W,
- un réflecteur approprié permettant de partager le flux lumineux sur la chaussée et le trottoir (2/3 sur la chaussée et 1/3 sur le trottoir).
- une enveloppe en fonte moulée protégée contre la corrosion.

L'appareillage électrique est inclus dans le projecteur.

### *Eclairage des trottoirs en surlargeur et des escaliers*

L'éclairage des trottoirs inférieurs est réalisé à partir de la main courante du garde corps extérieur par des couples d'appareils encastrés dans le garde-corps permettant d'obtenir l'impression d'une ligne continue d'éclairage. Le pas d'implantation de ces couples d'appareils est de 2,10m.

### *Eclairage des marches*

L'éclairage de chaque marche est réalisé à partir d'un appareil encastré dans la marche.

### *Eclairage des accès amont (escaliers, ascenseur et passerelle)*

Les accès font l'objet d'un éclairage de mise en valeur et destiné à assurer la sécurité du public

### *Eclairage de la pile P1*

L'éclairage de mise en valeur du pont à partir de la pile P1 est réalisé par des appareils encastrés dans le voile béton équipés de lampe de type iodures métalliques de puissance 70W.

Ces appareils sont encastrés dans le voile béton. Le tablier reçoit un éclairage indirect par une série de cinq appareils orientés vers la surface de l'eau proche de la pile et par une autre série cinq appareils orientés vers un point plus lointain.

Les bases des piles bénéficient de l'éclairage de ces appareils en partie basse.

### *Eclairage fonctionnel*

Un éclairage fonctionnel est mis en œuvre :

- à l'intérieur du pont au pas de 4,20 m, permettant une circulation aisée dans le tablier central,
- dans les locaux techniques concernés,
- dans les couloirs des culées.

Cet éclairage est complété par un éclairage ponctuel :

- au droit de chaque porte d'accès,
- au droit du déshumidificateur.

Il est réalisé par des réglettes étanches type fluo d'une puissance de 18W ou 36W.

Des blocs autonomes sont également installés. Un réseau de prises de courant est mis en œuvre pour permettre un complément d'éclairage et assurer l'alimentation d'outil de faibles puissances.

#### **4.3.11. Dispositifs d'accès, de visite et d'entretien**

L'accès à l'intérieur de l'ouvrage se fait :

- Au niveau de C0, par une porte aménagée dans le mur de quai, puis par un cheminement jusqu'au pied de talus, un escalier béton adossé au talus intérieur de la culée creuse, une galerie et une porte aménagée dans l'entretoise d'appui.
- La galerie est pourvue d'un garde-corps et permet l'accès aux appareils d'appui et aux emplacements des vérins.
- Au niveau de la culée C3, par un cheminement depuis le parking, un escalier métallique et une galerie fermée par une porte donnant accès au pont et aux appareils d'appui.
- Entre la pile P1 et la pile P2, au voisinage du profil 71 et entre la pile P2 et la culée C3, au voisinage du profil 81, deux trappes de visite permettent l'accès direct au tablier. L'accès à l'intrados est prévu par des nacelles à bras déporté circulant sur les trottoirs hauts. A titre conservatoire, deux percements Ø 20 mm permettant de



fixer des suspentes sont prévus tous les 4,20 m, en partie intérieure des encorbellements latéraux, à 0,20 m des âmes. La charge utile est de 2 x 5 tonnes par point de fixation.

- En sous face des travées 2 et 3, selon plans, par des ouvertures étanches et verrouillées, en intrados de l'ouvrage, pour permettre l'amenée des matériels et des équipements directement depuis le parvis.

#### 4.3.12. Surveillance, repères topométriques

Des repères de nivellement sont prévus :

- Au niveau de chaque appui, au moyen de cibles, collées sur les assises en béton : culée C0 (2 unités), pile P1 (une cible sur chaque fût), pile P2, culée C3 (2 unités).
- Au niveau du tablier, de part et d'autre de l'ouvrage, sur chaque axe d'appui (files 0, 46, 78 et 98) et au point de déformation maximal de chaque travée sous charge d'exploitation.

Le type de cible réfléchissante et leur mode de fixation sont définis lors des études d'exécution.

### 4.4. Mode de construction de l'ouvrage

#### 4.4.1. Construction des piles

Les travaux de construction de ce nouveau pont sur la Seine comprennent la démolition de l'estacade, de l'abri anti-aérien des usines Renault et ses tirants d'ancrage, et du perré, préalablement à la réalisation du batardeau. La pile P1 est réalisée à l'abri d'un batardeau en palplanches métalliques, ancré dans la craie, qui en constitue le fond relativement étanche. Il est arasé à la crue conventionnelle de chantier. La paroi située contre le quai est munie de tirants d'ancrage, destinés à équilibrer la poussée due aux terres.

En fin de travaux, ce batardeau est arasé au niveau de la face supérieure de la semelle, afin de ne pas constituer une gêne à la navigation, et en arrière des murs de soutènement solidaires de la pile.

La semelle de la pile P1 reçoit les dispositifs provisoires d'appui des charpentes métalliques en cours de montage ainsi que les supports destinés au vérinage ultérieur du tablier.

La pile P2 est construite selon des procédés traditionnels. La semelle de fondation prendra appui sur des barrettes, réalisées préalablement dans le cadre des travaux du parking. Elle est munie de coupleurs sur les faces verticales, pour permettre l'ancrage ultérieur des plancher du parking. Les étanchéités sur dalle sont à la charge du Parking.

#### 4.4.2. Construction des culées

La culée C0 est construite depuis la berge. Les terrassements généraux sont réalisés dans le cadre des travaux des Berges. L'accès à la berge basse est réalisé par une rampe, située en amont de la culée.

La culée C3 est réalisée en fouille ouverte. Les fondations profondes, en barrettes, sont réalisées préalablement dans le cadre des travaux du Parking. L'étanchéité de la fouille est assurée par la paroi moulée du parking, également réalisée au préalable. Après achèvement du génie civil, les parements de béton sont protégés, et la culée est remblayée jusqu'au niveau du chevêtre. Le compactage des remblais doit permettre l'assise des palées provisoires nécessaires pour le montage du tablier. Le niveau de terrassement (30,50 NGF) est choisi de façon à recouvrir les attentes des préfondés en béton armé, également réalisés au préalable.

#### 4.4.3. Construction du tablier

Les concepteurs ont étudié deux méthodes de mise en œuvre :

- La première consiste à pousser le tablier complet depuis une plateforme réalisée en rive droite, au nord de la RD1.
- La seconde méthode consistait à poser à la grue, sur palées provisoires, les tronçons situés entre la Seine et la culée C3, puis à acheminer, par des barges de forte capacité, la travée principale, munie ou non de ses encorbellements, et de ses réseaux.

Plusieurs constructeurs ont retenu, lors de l'appel d'offre, l'approvisionnement de la totalité du tablier par la Seine.

Cependant le groupement Bouygues, VBSC, ETDE a proposé une méthode originale consistant à livrer le tablier en trois colis par la Seine au moyen de barges de forte capacité puis à transférer les trois travées à l'aide de plateformes élévatrices ou Kamags, circulant sur la berges. Les colis ont été chargés le 8 avril 2007 sur deux barges. Celles-ci ont remonté les canaux belges jusqu'à la Mer du Nord. Puis, à partir du 10 avril, elles ont longé les côtes belges puis françaises jusqu'au Havre. Elles ont enfin embouqué la Seine le 15 Avril 2007. Les opérations de montage ont eut lieu du 29 avril au 1er mai 2007 pour les deux premiers tronçons à terre, puis répétées le 23 juin 2007 pour la travée sur la Seine.



*Photo 6 : transport sur barge des travées 2 et 3 (avril 2007)*



*Photo 7 : Pose du tronçon sur la Seine (Juin 2007)*

#### 4.4.4. Libération des appuis provisoires

En fin de montage, les appuis provisoires sont retirés, et le tablier est déposé sur ses appuis définitifs. Cette opération est réalisée après mise en place de la travée P2-C3.

#### 4.4.5. Contraintes de franchissement de la Seine

La mise en œuvre de tronçon de tablier par transport fluvial a nécessité l'obtention par l'Entreprise de toutes les autorisations nécessaires auprès des services concernés : Service de la Navigation de la Seine et Port Autonome de Paris.

#### 4.4.6. Contraintes de franchissement des routes

Les phases de mise en œuvre du tablier ont reçu l'accord des Services Techniques de la Ville de Boulogne-Billancourt et des Services Techniques du Conseil Général des Hauts de Seine et des Services de la DDE des Hauts de Seine.



#### 4.5. Calendrier d'exécution

La durée totale du chantier est de 25 mois, y compris marge pour aléas, intempéries normalement prévisibles et opérations de réception, hors pose de l'accès aval sur la dalle du parking souterrain.

Le calendrier des travaux suppose une parfaite coordination avec les travaux du parc de stationnement. Après achèvement du tablier métallique, de ses superstructures et des raccordements de réseaux, les travaux du parking peuvent être repris. Ils sont entrepris de préférence en sous-œuvre, toute précaution devant être prise pour assurer la protection du tablier et la sécurité des usagers qui empruntent ultérieurement le pont. Cependant, la réalisation des terrassements sous le pont, l'approvisionnement du béton à la pompe et la stabilisation des parois par des bandes de planchers butonnés sont des opérations extrêmement délicates à réaliser autour de l'ouvrage en service, en terme de phasage et de sécurité.

#### 4.6. Calculs justificatifs

##### 4.6.1. Les calculs généraux

- Ces calculs ont été conduits avec le logiciel Pythagore® de Setec Tpi. Compte tenu de la grande largeur ouverte au public et de l'étroitesse de la chaussée, les calculs en service prennent en compte l'enveloppe des charges piétonnes et routières réglementaires, et de la charge réglementaire sur les passerelles.
- Les calculs en service prennent en compte l'enveloppe des charges cumulées des charges piétonnes et routières réglementaires, et des charges pour passerelles.
  - Charge générale de piéton sur les trottoirs: Pi1  
Charge de 150 kg/m<sup>2</sup> de l'article 13-1 du fascicule 61 – titre II, concomitante avec les charges routières (enveloppe des charges A, Bc et Bt), et affectée aux éléments des lignes médianes des trottoirs hauts, gradins, et trottoirs bas.
  - Charge générale de passerelle piéton : Pi2  
Il s'agit de la charge piétonne a(l) définie à l'article 13-2 du fascicule 61 – titre II appliquée en toute section à la largeur totale du tablier
- La charge est affectée aux éléments de la ligne médiane chaussée, avec les excentricités convenables, ainsi qu'aux lignes de chargement des trottoirs.

Contraintes normales en semelle supérieure

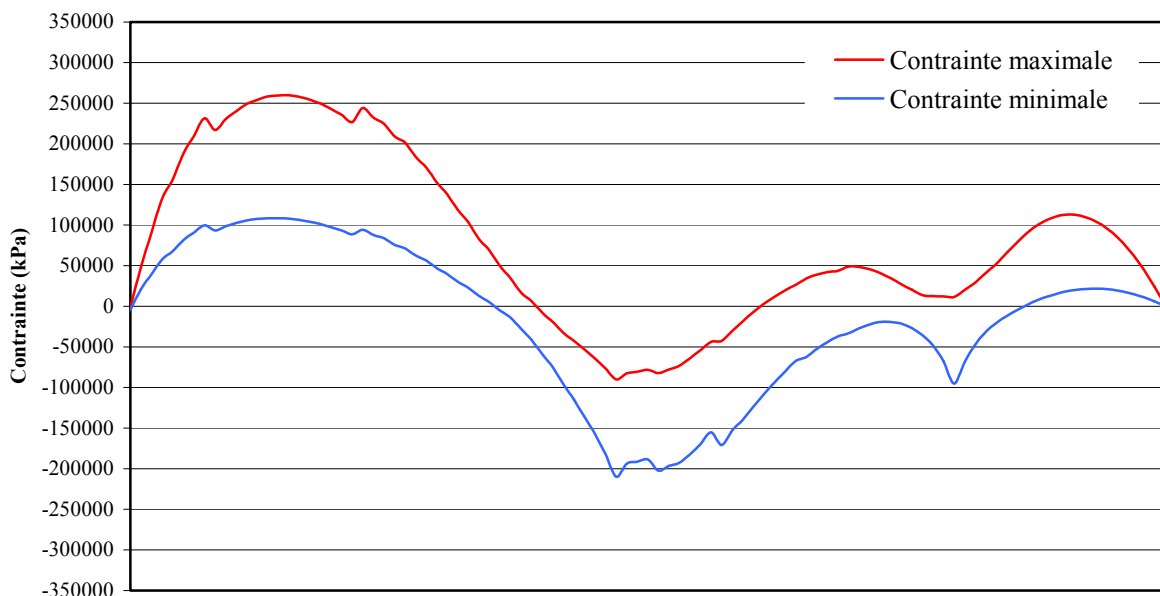
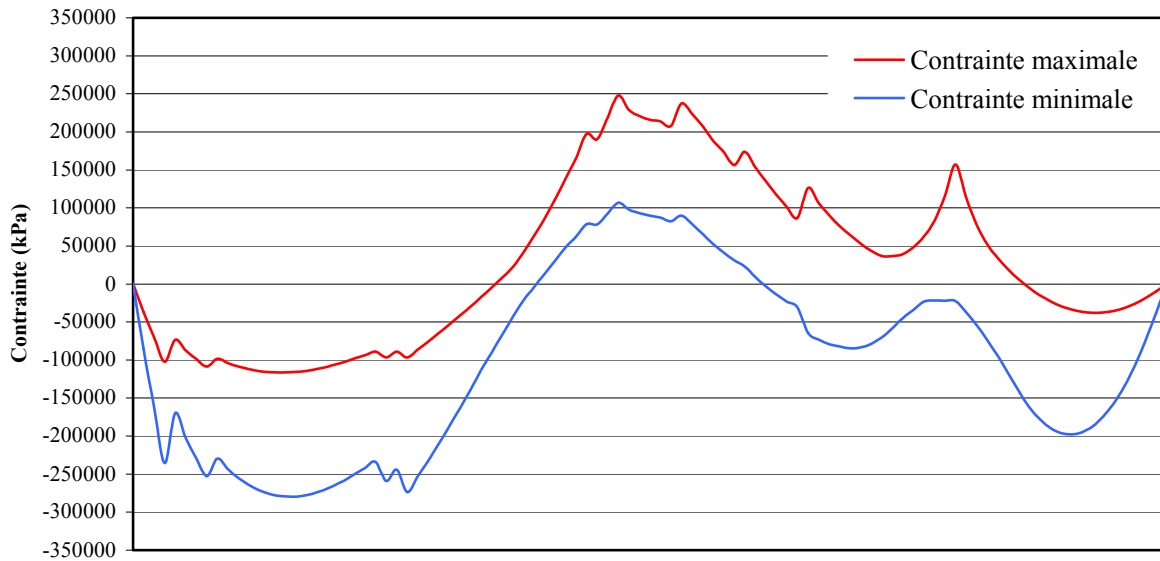


Figure 10 : Contraintes normales en fibre supérieure à l'ELU

**Contraintes normales en semelle inférieure**



*Figure 11 : Contraintes normales en fibre inférieure à l'ELU*

Les épaisseurs mises en œuvre à l'Avant Projet sont satisfaisantes en service et les contraintes longitudinales extrêmes obtenues à l'ELU sont de l'ordre de 250 Mpa dans les zones comprimées et de 280 MPa dans les zones tendues.

**4.6.2. Stabilité des tôles aux états limites ultimes**

Une vérification au voilement des tôles comprimées raidies conformément à l'Eurocode 3 partie 1-5 « Règles supplémentaires pour les plaques planes, raidies ou non, chargées dans leur plan » XP ENV 1993-1-5 de décembre 2000, a été effectuée.

Aux états limites ultimes, la vérification de la résistance d'une section transversale doit prendre en compte les effets suivants :

- les contraintes longitudinales en tenant compte du traînage de cisaillement et du voilement de la plaque ;
- les contraintes transversales en tenant compte de leur répartition et du voilement de la plaque ;
- les contraintes de cisaillement en tenant compte du voilement de la plaque ;
- les effets combinés des contraintes longitudinales, transversales, et de cisaillement agissant dans la même section transversale le cas échéant.

Cette vérification est effectuée de la manière suivante :

$$\eta_1 = \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_{yd}} \leq 1,0$$

$$\eta_2 = \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_{ywd}} \leq 1,0$$

$$\eta_3 = \frac{\tau_{Ed}}{\chi_v f_{ywd}} \leq 1,0$$

$$\eta_4 = \eta_1 + \left[ 1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right] [2\eta_3 - 1]^2 \leq 1,0$$

où  $f_{yd}$  est la limite d'élasticité de calcul  $f_y/\gamma_{M1}$  ou  $f_y/\gamma_{M0}$  selon l'ENV 1993-1-1:1992 avec  $\gamma_{M0} = 1.0$  car les produits en acier utilisés portent la marque NF et  $\gamma_{M1} = 1.1$  pour des sections de classe 4 – les indices supplémentaires  $ff$  et  $w$  faisant respectivement référence à la semelle et à l'âme -  $\chi_v$  est la fonction de résistance au cisaillement,  $M_{f,Rd}$  le moment résistant plastique de calcul d'une section transversale composée uniquement des semelles, et  $M_{pl,Rd}$  la résistance plastique de la section transversale (indépendamment de la classe de section transversale). Les quatre coefficients sont calculés directement par le programme Pythagore.

### vérification de la stabilité des tôles comprimées

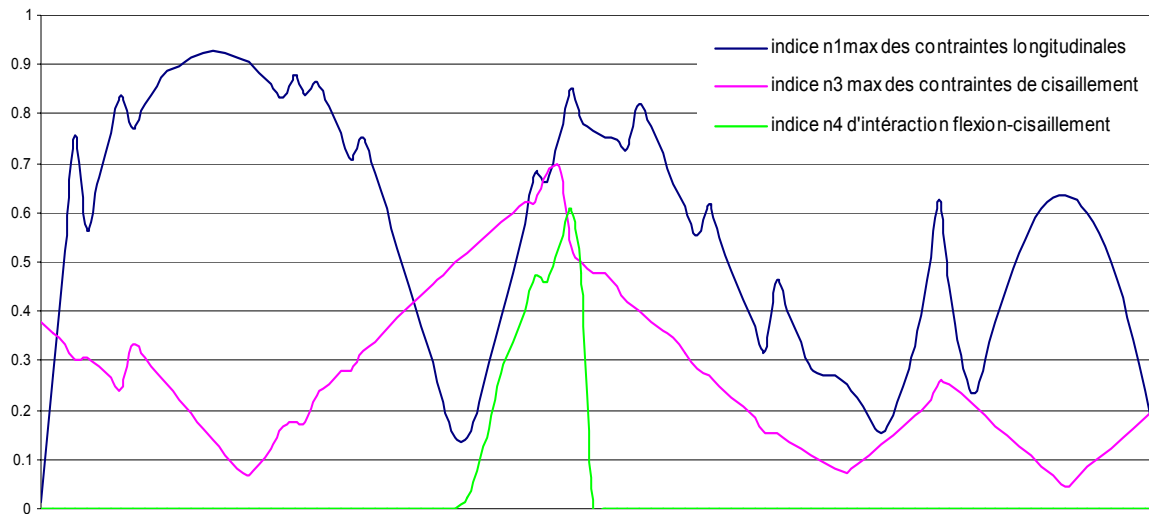


Figure 12 : Coefficients n1, n3, n4

Parallèlement, une vérification classique à l'aide des abaques de Klöppel a été conduite.

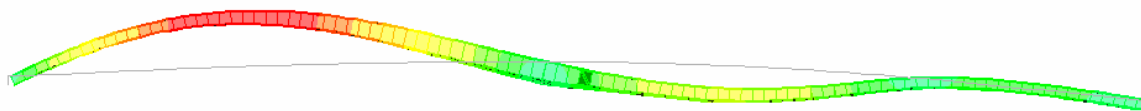
#### 4.6.3. Comportement dynamique

Les vérifications du comportement dynamique du pont au passage des piétons ont été conduites conformément aux recommandations du guide pour la prise en compte du comportement vibratoire des passerelles rédigé par l'AFGC et le SETRA. Cette étude confirme l'existence de deux modes propres critiques pour les travées 2 et 3. Les essais dynamiques prévus en tranche conditionnelle dans le marché de l'Entreprise permettent de conclure sur la nécessité de la mise en place des amortisseurs dynamiques dans ces travées.

Les quatre premiers modes propres globaux (de fréquence propre  $f_i$ , et de masse généralisée  $M_i$ ), sont les suivants :

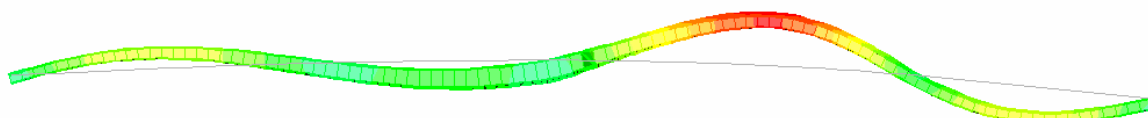
Mode global 1 : flexion longitudinale de la travée 1

	Ouvrage à vide	Ouvrage chargé à 70 kg/m <sup>2</sup>
$f_1$ (Hz)	0.75	0.730
$M_1$ (t)	898	968



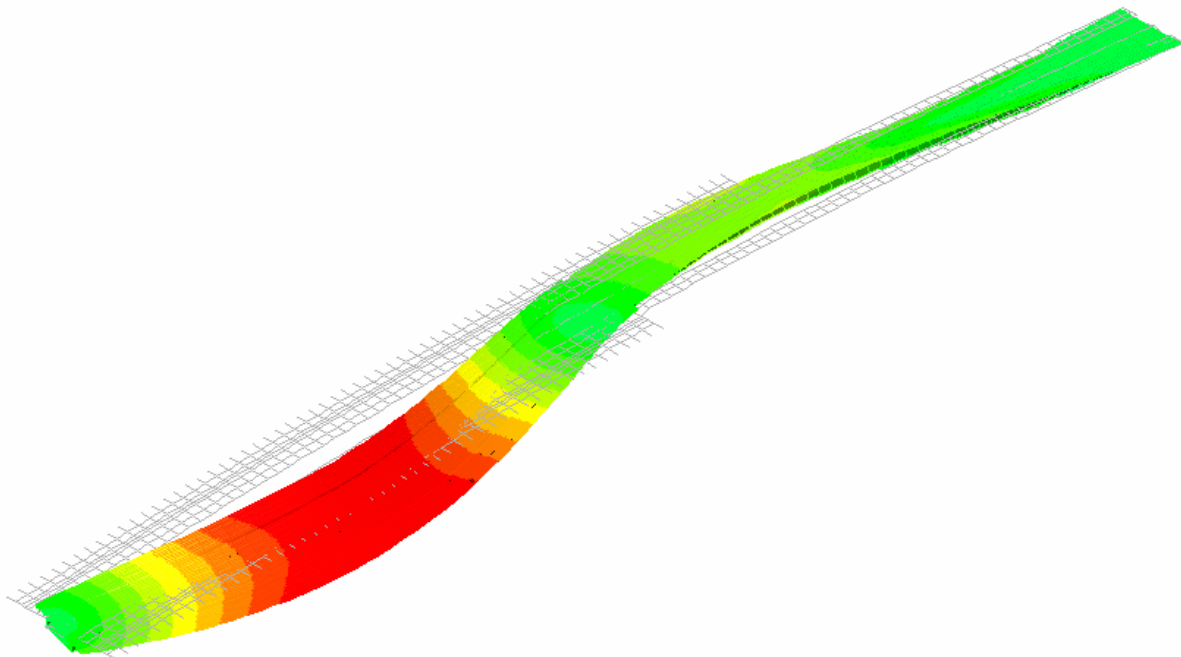
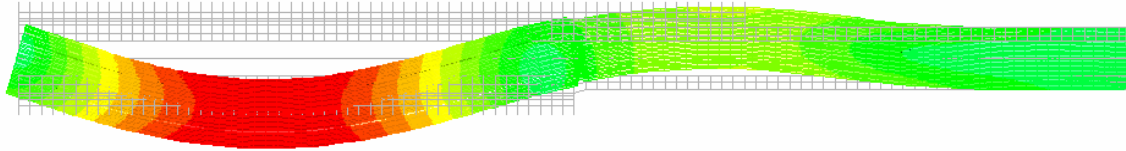
Mode global 2 : flexion longitudinale des travées 2 et 3

	Ouvrage à vide	Ouvrage chargé à 70 kg/m <sup>2</sup>
$f_2$ (Hz)	1.687	1.630
$M_2$ (t)	451	483



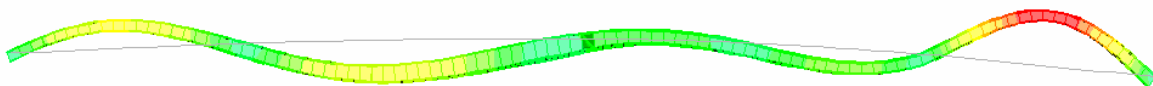
Mode global 3 : flexion horizontale et torsion de la travée 1

	Ouvrage à vide	Ouvrage chargé à 70 kg/m <sup>2</sup>
f <sub>3</sub> (Hz)	2.003	1.932
M <sub>3</sub> (t)	939	1003



Mode global 4 : flexion longitudinale de la travée 3

	Ouvrage à vide	Ouvrage chargé à 70 kg/m <sup>2</sup>
f <sub>4</sub> (Hz)	2.540	2.449
M <sub>4</sub> (t)	420	460



L'expérience acquise récemment sur divers ouvrages réservés aux piétons invite les concepteurs à une grande vigilance vis-à-vis des phénomènes dynamiques. Les cas plus récents mettent en particulier en évidence les risques d'inconfort liés aux déplacements transversaux et les phénomènes de synchronisation de la marche des piétons qu'ils peuvent engendrer. Le « Guide du Comportement Dynamique des Passerelles Piétonnes » rédigé par le SETRA et l'AFGC propose une méthodologie ainsi que des recommandations pour la prise en compte des effets dynamiques sur les passerelles piétonnes, dont il convient de s'inspirer pour l'étude des effets dynamiques de l'ouvrage considéré.



### Vibrations verticales de la structure

Les calculs dynamiques effectués conduisent, pour les modes propres critiques 2 et 4 de vibration de la structure, à des accélérations verticales respectives de  $1.4 \text{ m/s}^2$  et  $1.17 \text{ m/s}^2$ . Ces valeurs appartiennent à la plage de confort minimum [ $1 \text{ m/s}^2$  ;  $2.5 \text{ m/s}^2$ ] et seront donc ressenties par les usagers.

Pour maîtriser le comportement de la structure sur les travées de rive 2 et 3, on pourra utiliser des amortisseurs à masse oscillante accordée. Une masse de l'ordre de 3% de la masse généralisée de chaque mode considéré, placée au ventre de la déformée modale considérée, est active sur une gamme de fréquences suffisamment large pour être efficace que l'ouvrage soit chargé ou non. La décision de mettre en place ces amortisseurs sera prise à l'issue des essais dynamiques réalisés lors des épreuves de chargement.

### Vibrations horizontales de la structure :

Le calcul dynamique effectué pour le mode propre 3 de la structure (flexion horizontale de la travée 1) conduit à une accélération horizontale maximale très faible, appartenant à la plage de confort maximum.

#### 4.6.4. Les calculs de détail

##### Calcul des encorbellements

Le modèle étudié pour la zone de grande hauteur comporte deux plumes primaires et une plume secondaire attachées sur un demi caisson. Le calcul spatial a confirmé le bon comportement des plumes sous l'effet de la charge concentrée de 6 tonnes et de la charge piétonne répartie, aussi bien en statique qu'en dynamique.

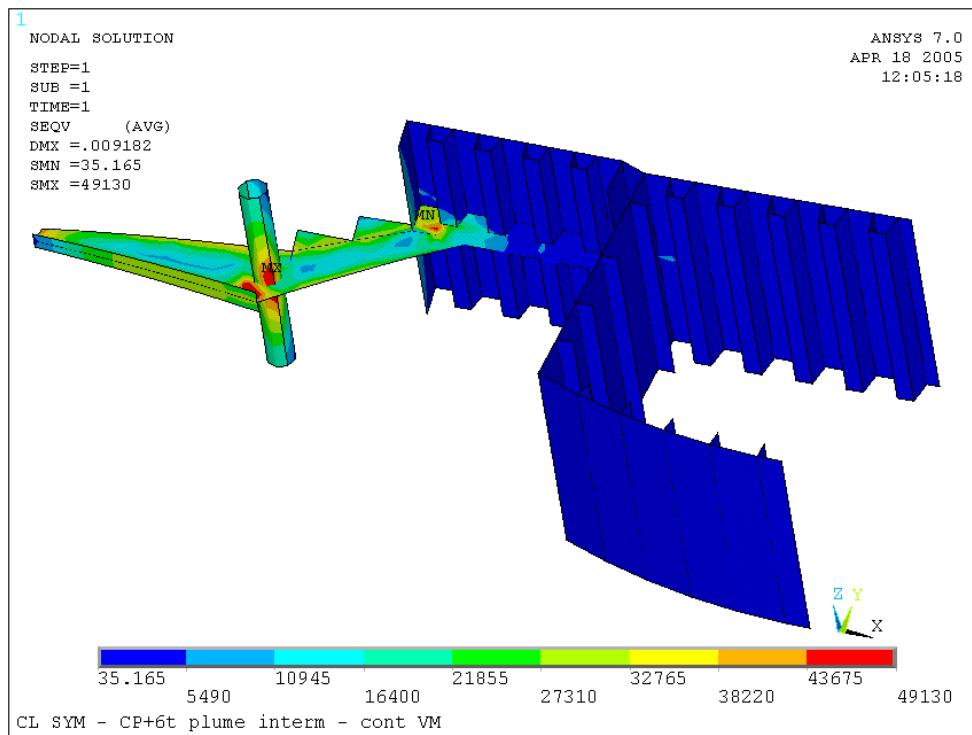


Figure 13 : Contraintes de Von Mises dans un encorbellement secondaire (roue de 6 Tonnes)

Le modèle étudié pour la zone de faible hauteur comporte uniquement une console primaire percée au passage des réseaux. Le calcul spatial a confirmé le bon comportement de la console sous l'effet des charges statiques et en dynamique. Les déformations de l'encorbellement sous charge d'exploitation restent très faibles (4mm). La contrainte équivalente de Von Mises est maximale entre les deux évidements pour le passage des réseaux de chaud/froid urbain, ou elle atteint 277 MPa. Toutefois cette disposition a été modifiée par l'entreprise lors de l'exécution pour réaliser un percement unique.



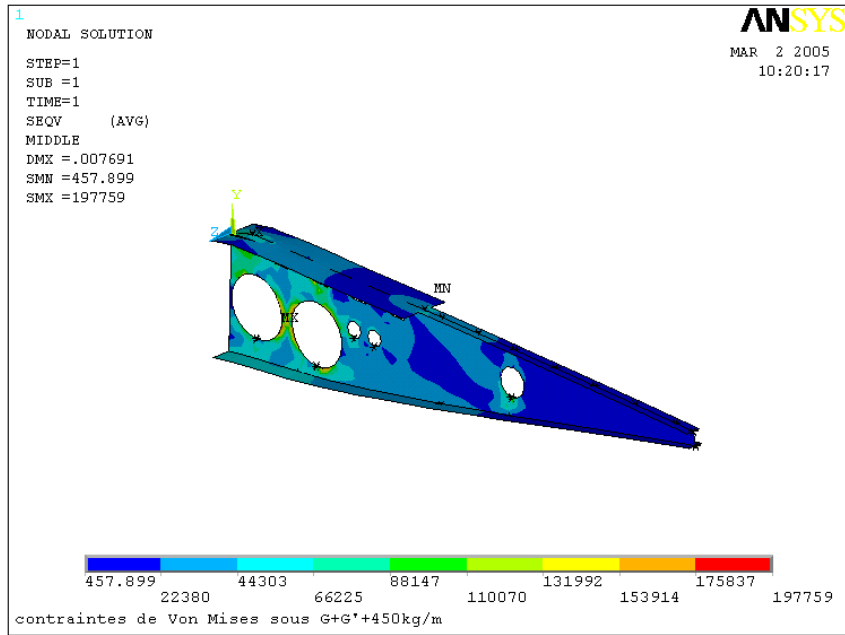


Figure 14 : Contrainte de Von Mises dans les encorbellements de faible hauteur

Vérification de la stabilité du fond de caisson à double courbure

La stabilité des tôles courbes a été étudiée à partir de la recherche des modes de flambement des raidisseurs de la tôle de fond.

Le calcul proposé permet de justifier la résistance (poussée au vide) et la stabilité du fond courbe :

- modélisation du fond doublement courbe (sphérique) entre deux diaphragmes
- 10 raidisseurs longitudinaux
- Conditions d'appui aux bords :
  - sur la section transversale (diaphragme) : poutre indéformable
  - sur le profil en long (âme) : appuis simples orientés suivant la courbure
- Effort de compression appliqué suivant la courbure qui correspond à une contrainte uniforme de 250 MPa (VALEURS E.L.U.), valeur maximale calculée issue du modèle général.

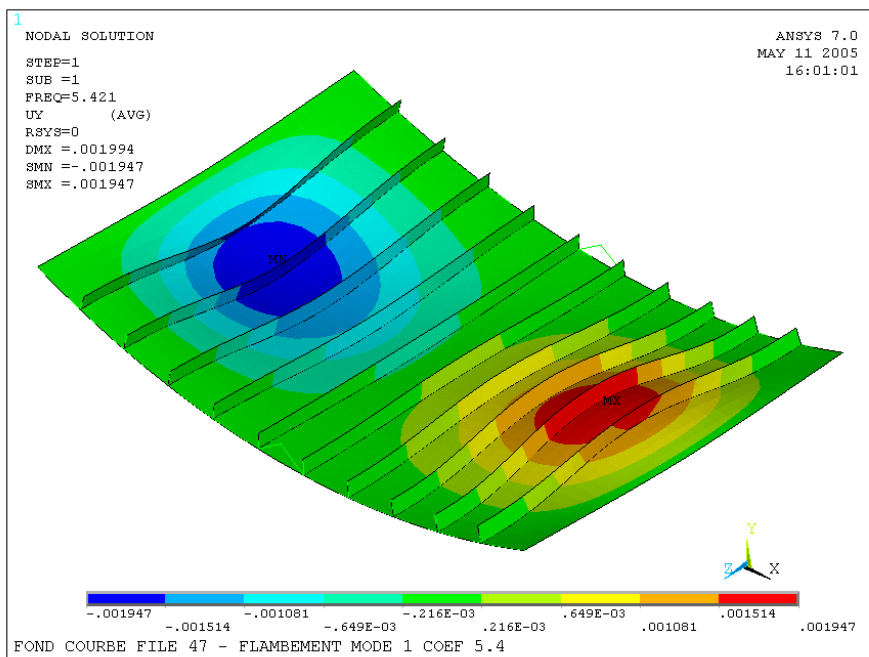


Figure 15 : Stabilité de la tôle de fond

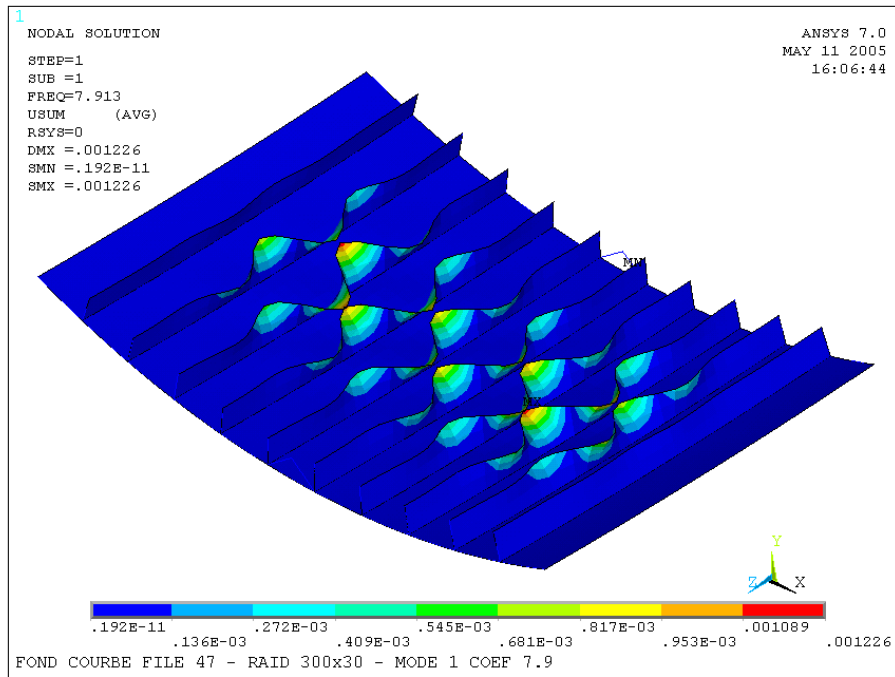


Figure 16 : Mode de flambement des raidisseurs des tôles courbes

L'étude est conduite simultanément sur la tôle de fond et les raidisseurs. La poussée au vide engendré par la courbure du profil en long a montré la nécessité de renforcer le raidissage dans la zone d'appui. La stabilité du fond de caisson, qui très comprimé, est assurée.

#### 4.7. Coût de l'ouvrage

Le montant du marché, base avril 2005, est de 13 40 000 € hors taxe, décomposés comme suit :

Lot	Postes	Montant H.T. (Euros)
1	Génie civil	4 400 000
2	Charpente métallique, garde corps métallique et platelage bois	7 640 000
3	Eclairage, distribution électrique et ascenseur y compris option bornes	1 000 000
	<b>Total</b>	<b>13 040 000</b>

#### 4.8. Le marché de travaux

La consultation des Entreprises est européenne. La procédure d'appel d'offres ouvert a été retenue. Le marché est décomposé en trois lots techniques :

- Lot 1 : Génie civil, et mandataire du groupement,
- Lot 2 : Charpente métallique, garde corps métalliques et platelage bois,
- Lot 3 : Eclairage, distribution électrique et ascenseur.

L'ensemble des trois lots donne lieu à un marché unique, passé à un groupement d'entrepreneurs groupés conjoints. La commission d'appel d'offres a choisit l'offre économiquement la plus avantageuse conformément aux critères d'attribution suivants :

- Valeur technique de l'offre
- Moyens mis en œuvre par l'Entreprise pour la réalisation du chantier
- Prix des prestations

Les candidats pouvaient présenter une offre comportant des variantes par rapport aux spécifications des cahiers des charges qui ne sont pas désignées ci-après comme des exigences minimales à respecter et/ou des spécifications qualifiées d'intangibles :

- Données fonctionnelles
- Contraintes architecturales et aspect de l'ouvrage
- Espacement et position des raidisseurs transversaux du caisson
- Platelage orthotrope sous la chaussée et superstructures du tablier

La consultation des entreprises a été lancée le 28 février 2005. La date de remise des offres était fixée au 25 avril 2005.

A l'issue de cette consultation le marché de travaux a été passé au groupement Bouygues, Victor Buyck Steel Construction et ETDE. L'ordre de service de commencer les travaux a été donné le 9 mars 2006. L'achèvement des travaux du pont est prévu en janvier 2008. L'accès aval et l'ascenseur seront, quant à eux, livrés fin 2008, après achèvement du parking souterrain situé en rive droite de la Seine.

Fiche caractéristique de l'ouvrage:

Béton pour appuis (hors barettes et pieux)	1950 m <sup>3</sup>
Aciers de charpente	2000 Tonnes
Béton pour pieux forés	500 m <sup>3</sup>



*Photo 8 : Les encorbellements*

Crédit photographique : Franck Terlin pour Setec TPI et JB Datry