

Étude du renforcement d'un pont mixte

Clément DESODT - Hélène HORSIN MOLINARO
Hadrien RATTEZ

Edité le 09/04/2018

Cette ressource est issue du dossier d'ingénierie d'agrégation Génie Civil d'Hadrien Rattez ; elle s'inscrit dans la logique de développement durable, car il s'agit de prolonger la durée de vie d'une structure ancienne et de l'adapter à ses nouvelles fonctions.

La réalisation d'ouvrages d'art (ponts, barrages hydroélectriques ...) exige investissements et logistique importants, or le passage du temps laisse des traces sur ces structures : le vieillissement entraîne une dégradation des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux. En outre, des changements nécessaires dans l'évolution des besoins nécessitent modifications ou renforcements de la structure.

Ces réparations, renforcements, ou rénovations d'ouvrages représentent une part importante des marchés du génie civil actuel (environ 70%). Par ailleurs la France possède de nombreux monuments possédant une grande valeur historique qu'il convient de préserver le plus longtemps possible. Les choix économiques actuels des sociétés industrielles sont orientés vers la sauvegarde et la réparation des structures existantes, alliant importance économique, patrimoniale et durabilité.



Figure 1 : Le pont Jeanne d'Arc sur la seine à Rouen, Image Luc Nueffer, Structurae [1]

Cette ressource s'intéresse au renforcement et à la rénovation du pont Jeanne d'Arc de Rouen (figure 1) ; même s'il ne possède pas de valeur historique il permet d'apprécier l'évolution de la conception et des techniques de construction employées, mais aussi les moyens de contrôle actuels et les techniques de réparation envisageables. Ainsi, l'étude de cet ouvrage permet de combiner les aspects mécaniques et technologiques.

Une première partie présente l'étude consistant à déterminer l'état du pont à l'aide de capteurs et la démarche de contrôle permettant d'en déduire les réparations à effectuer pour conserver l'aptitude au service de ce pont. Cette première étape amène ensuite aux vérifications structurales afin que le pont Jeanne d'Arc puisse reprendre les nouvelles charges prévues. Les travaux de renforcement réalisés sont exposés, puis les techniques de construction utilisées pour ce pont en 1956 sont décrites. Enfin, il est proposé deux études de cas « *Influence des dénivellations d'appui d'un pont mixte* » et « *Fatigue de la charpente métallique d'un pont mixte* ».

Les termes comportant une * sont définis dans la ressource « *Petit lexique du pont mixte* ».

1 – Contexte

Le pont Jeanne d'Arc (figures 1, 2 et 3) situé sur la Seine au centre de la ville de Rouen, a été construit entre 1956 et 1959, après la destruction du port et des ponts de Rouen durant la seconde guerre mondiale. Ce pont, artère importante de Rouen, est traversé par les deux lignes de métro de la ville, par trois voies routières et possède aussi des trottoirs. Ce pont a déjà vu son utilisation modifiée au cours de son existence : conçu pour une circulation automobile et un large trottoir (figure 3), la mise en service du métro en 1994 a nécessité une adaptation de sa circulation pour les voies ferrées (figure 4) et c'est l'augmentation de la capacité des rames de métro qui a amené à la vérification et au renforcement du pont en 2012 [2].



Figure 2 : Sur le pont Jeanne d'Arc, Rouen, Image Luc Nueffer, Structurae [1]

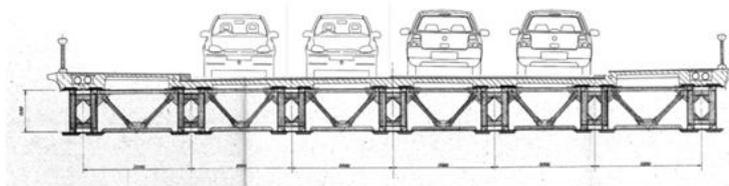


Figure 3 : Circulation sur le pont Jeanne d'Arc de 1956-1994

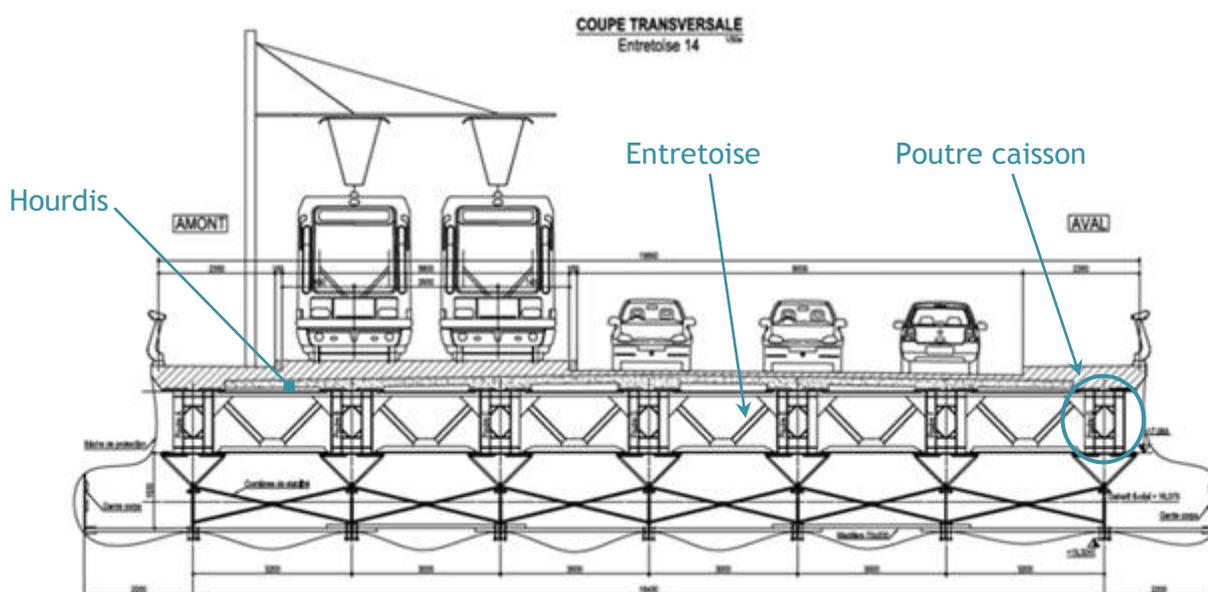


Figure 4 : Circulation sur le pont Jeanne d'Arc à la mise en service du métro en 1994

Le pont Jeanne d'Arc est devenu un pont routier et ferroviaire à trois travées* en construction mixte acier-béton. Son tablier* de 196 mètres (portées* 48/100/48) est supporté par sept poutres en acier de hauteurs variables. Chaque poutre caisson* est rigidifiée à l'intérieur par vingt-neuf raidisseurs* et contreventée* en travées par vingt-neuf entretoises* (figure 5) en X ou en V. Sur ces poutres repose un hourdis* en béton armé d'épaisseur variable. Tous les appareils d'appuis sur lesquels repose le tablier sont métalliques, seul l'appareil sur la pile rive droite est fixe (figure 6). Les trois autres sont mobiles et constitués de bielles* métalliques, à raison de deux fois deux bielles par poutre.



Figure 5 : Entretoises en X

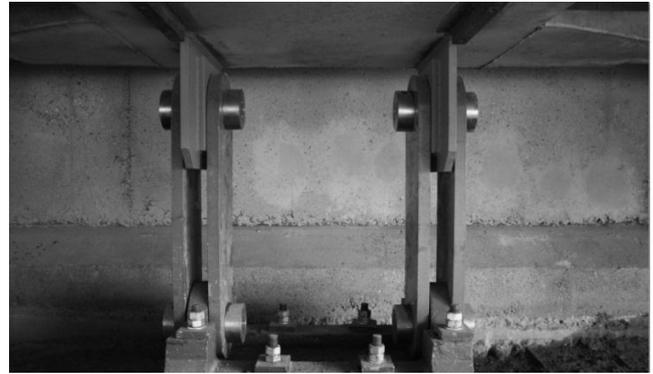


Figure 6 : Bielles

La CREA¹, maître d'ouvrage, a chargé le maître d'œuvre, la société Setec Tpi [3], d'identifier les travaux nécessaires à l'entretien courant et spécialisé de l'ouvrage, mais aussi de concevoir un renforcement de l'ouvrage afin de supporter des rames de 45 m (et de 55 m à long terme). L'appel d'offre comprenait la mise en place de 80 tonnes de renforts soudés, l'application de 30000 m² de protection anti corrosion, le désamiantage des poutres en acier, la réfection des appareils d'appui, et le remplacement des gardes corps. Le chantier était initialement prévu sur une durée de 17 mois, pour un montant total de 6,5 millions d'euros.

2 – Contrôles et diagnostic préliminaires

2.1 - Surveillance des bielles

Dès 2008, en prévision de l'augmentation de la capacité des rames de métro, la mise en place d'une instrumentation du tablier a permis de récolter les données nécessaires aux études de faisabilité, puis d'engager un nouveau cycle d'inspection détaillé.

Lors de la première visite, il a été constaté que les bielles de trois des sept appareils d'appuis de la culée* rive gauche étaient fortement corrodés et présentaient des fissures (figure 7). En raison des travaux de réparation prévus pour 2011, il a été décidé la mise en œuvre d'une surveillance métrologique en complément des actions de surveillance visuelle. Cette décision permettait une alternative aux coûteux travaux de réparation d'urgence, et autorisait l'usage du pont en attendant les travaux.



Figure 7 : Bielle corrodée équipée d'un capteur de déplacement

¹ Communauté d'Agglomération Rouen-Elbeuf-Austreberthe

Le principal risque dû à une aggravation de la fissuration des bielles des appareils d'appui était la dégradation des voies supportant le métro par le soulèvement excessif du tablier par rapport à la culée suite à la rupture de plusieurs bielles. Ainsi, la surveillance a consisté dans la mise en place de capteurs de déplacements du tablier (T1, T4, T7, figure 8 et figure 9) et des bielles (B1, B4, B7, figure 8 et figure 9) ainsi que de capteurs pour mesurer l'ouverture des fissures (F3, F7, figure 8), et de capteurs de température (Temp, figure 8).

Afin de différencier les mouvements dus aux effets thermiques des mouvements purement mécaniques, quatre sondes de température (Temp, figure 8) ont été installées, deux sont associées aux capteurs de déplacement situés aux extrémités de la zone instrumentée, deux autres sondes enregistrent la température du béton et de l'acier du tablier. Ces deux sondes ne subissent pas les effets de l'ensoleillement.

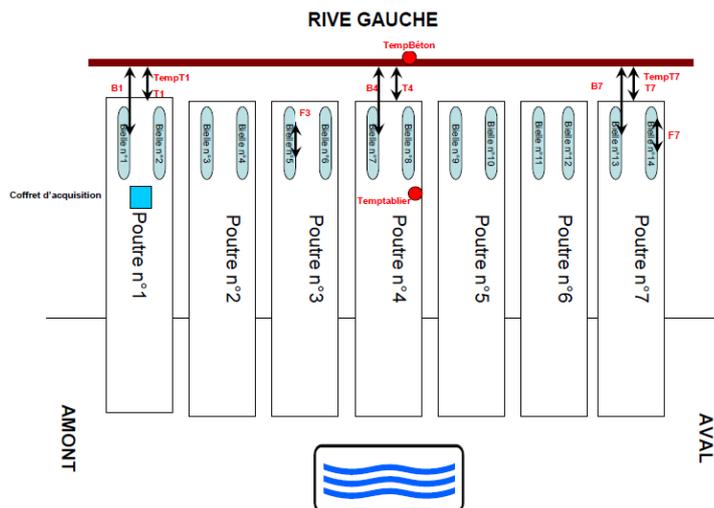


Figure 8 : Schéma du positionnement des différents capteurs



Figure 9 : Capteurs sur bielle et tablier

Après plusieurs mois de mesures (entre 2009 et 2010), une évolution rapide et irréversible de la fissuration des bielles a été observée. Cette fissuration est corrélée avec les mouvements du tablier. En effet, les bielles sont tellement corrodées que leur rotation est bloquée ; ainsi, les dilatations du tablier sont reprises non pas par la rotation des bielles mais par leur fissuration. Un système d'alarme de surveillance des fissures a été mis en place, devant se déclencher en cas de déplacement supérieur à une valeur critique ; ce qui ne s'est pas produit.

2.2 - Epreuve d'ouvrage

Une des questions majeures durant la phase de vérifications de l'ouvrage était de savoir si le hourdis était collaborant* ou non. En effet, les plans d'origine comportent des incohérences pour la répartition des connecteurs : représentés uniquement sur quelques portions des poutres caissons sur les coupes longitudinales, ils sont représentés sur chaque coupe transversale du tablier. De plus, à l'époque, les calculs étaient effectués en considérant le hourdis comme un « poids mort » ne servant qu'à transmettre les charges de la chaussée à la charpente métallique. C'est pourquoi les vérifications aux ELU* et ELS* considèrent le hourdis comme non collaborant.

En 1994 lors de la mise en service du métro, des épreuves d'ouvrage ont été effectuées. Les résultats du modèle numérique complet du pont réalisé avec le logiciel Pythagore [4] (figure 10) ont alors pu être comparés avec les résultats de ces épreuves. Cette comparaison des résultats a porté à la fois sur les contraintes dans les poutres caissons et sur les flèches du tablier au milieu de la travée centrale.

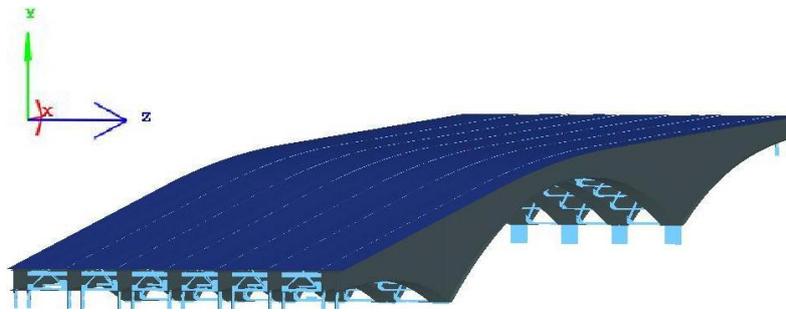


Figure 10 : Modèle réalisé avec le logiciel Pythagore [4]

Les valeurs mesurées (figure 11 courbe rouge), et les valeurs obtenues par le modèle du bureau d'étude chargé des études en 1994 (courbe violette), ont été comparées au modèle numérique en considérant plusieurs configurations :

- Hourdis non collaborant (courbe verte) : les connecteurs sont articulés à chacune de leurs extrémité, sauf les connecteurs situés à l'extrémité amont du pont, afin d'éviter un mouvement de corps rigide,
- Hourdis collaborant (courbe marron) : tous les connecteurs sont encastrés dans les poutres caissons,
- Hourdis collaborant (courbe bleue) avec modélisation de la plateforme du métro.

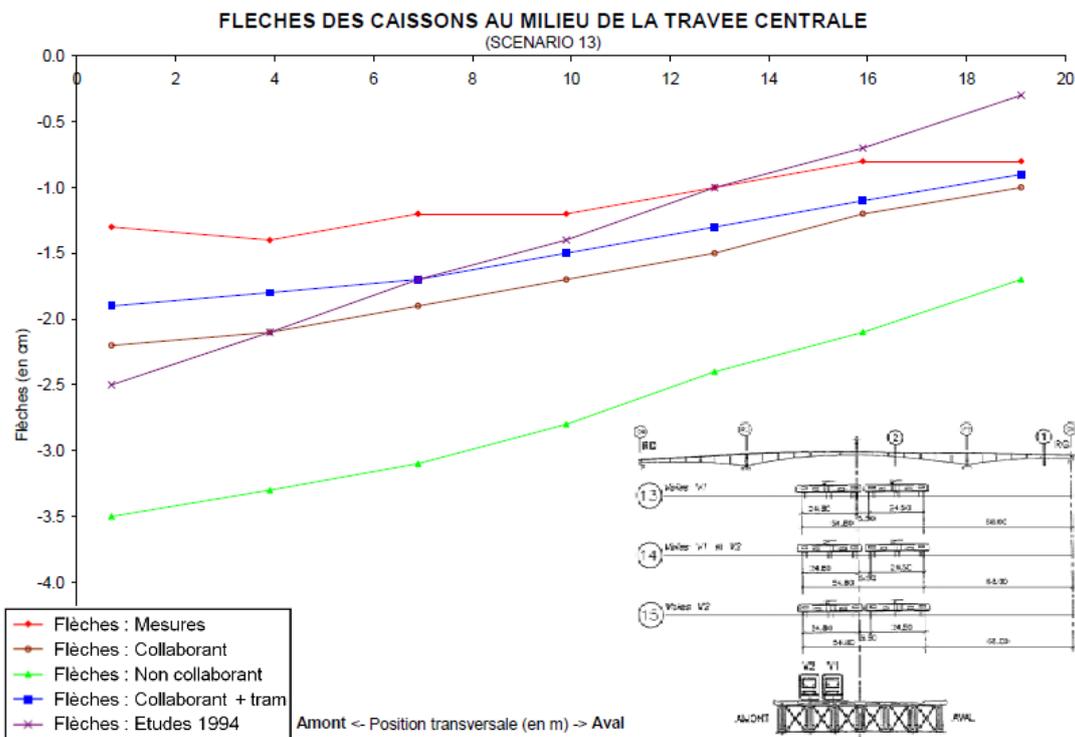


Figure 11 : Comparaison des valeurs de flèches à la clé dans les différentes poutres pour l'épreuve de chargement schématisé en bas à droite

Le modèle avec le hourdis collaborant et la plateforme modélisée (bleu) est celui qui se rapproche le plus des mesures (rouge), aussi bien au niveau des valeurs de flèches que des valeurs de contraintes. Ainsi, le hourdis a été considéré comme collaborant pour les études de fatigue (voir ressource « *Fatigue de la charpente métallique d'un pont mixte* »).

3 – Travaux réalisés sur l'ouvrage

Plusieurs niveaux de travaux sont entrepris, le renforcement du pont a lieu en différents points, les poutres caisson, les entretoises et les bielles d'appuis des deux culées, puis une phase de décapage et peinture termine les travaux.

Pour réaliser tous les travaux de renforcement et de peinture, un platelage* en bois a été mis en place au niveau de la sous-face du tablier. Il est accroché aux semelles* à l'aide de pinces dites « SNCF », afin de diminuer le moins possible le gabarit fluvial et de réduire l'impact sur les voies routières des quais bas rive droite (figure 12).



Figure 12 : Le platelage installé aux semelles inférieures des poutres via les pinces

3.1 - Renforcement des poutres caissons

Les études d'exécution, réalisées par la société AC4S [5] ont montré que le tablier souffrait principalement du phénomène de fatigue de l'acier, plutôt que d'un manque de capacité portante. Une partie de ce renforcement a consisté à venir souder des tôles de 15 à 25 millimètres d'épaisseur sous les semelles inférieures des quatre poutres situées sous le métro, au niveau des deux travées de rive (en rouge figure 13).

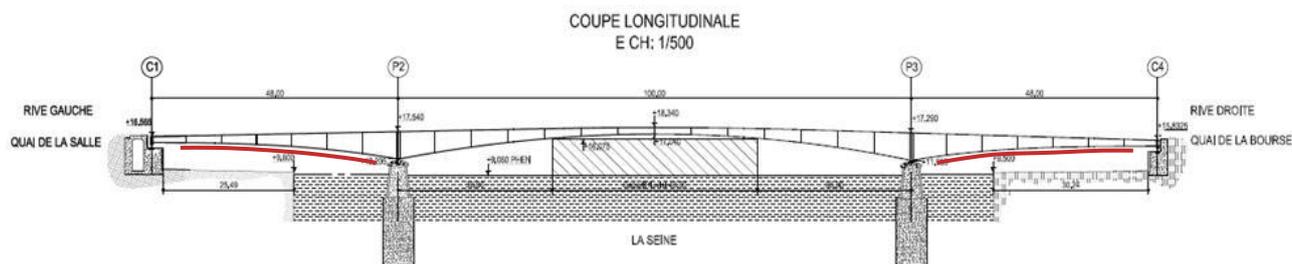


Figure 13 : Coupe longitudinale du pont Jeanne d'Arc

Le quai de la rive droite est occupé par une voie de chemin de fer et une voie routière, contrainte qui a nécessité une mise en place spécifique qui permet de libérer les voies de circulation de la SNCF rapidement (quelques minutes). Les renforts plaqués sur la semelle sont soudés (figure 14).



Figure 14 : Soudage des renforts

3.2 - Renforcement des entretoises

Les entretoises à la clé* de la travée centrale sont les parties de l'ouvrage les plus sensibles au phénomène de fatigue. La solution initiale qui consistait à venir souder des renforts sur les diagonales existantes, très fines, a été abandonnée au profit d'une solution permettant à la fois de réduire les efforts dans les diagonales, mais aussi de rigidifier le tablier en flexion transversale. Les cinq entretoises concernées sont en V, contrairement aux autres entretoises en X plus rigides. La conception des renforts consiste à ajouter des diagonales à celles existantes : on vient donc rajouter un V inversé (figure 15).



Figure 15 : Entretoise renforcée

3.3 - Remplacement des bielles d'appuis des deux culées

Dans le paragraphe 2.1 de surveillance de l'ouvrage, il a été constaté que les bielles au niveau des culées étaient très fortement corrodées et fissurées. Elles ont donc été toutes remplacées, et la protection anticorrosion des socles a été renouvelée.

Pour réaliser ces travaux, la poutre du tablier est soulevée par des vérins et posée sur un appui provisoire durant le remplacement (figure 16). Ces opérations délicates ont eu lieu de nuit pour les quatre poutres situées sous le métro (car les appuis provisoires n'empêchent pas le soulèvement du tablier qui peut se produire lors du passage du métro), et de jour pour les autres.



Figure 16 : Vérinage pour le changement des bielles

3.4 - Peinture et désamiantage

Le décapage d'un ouvrage d'art existant est une opération très délicate par les risques pour l'environnement (la Seine et ses berges), pour les usagers circulant aux alentours de l'ouvrage et enfin pour les ouvriers travaillant sur le chantier.

À la découverte de traces de plomb dans la peinture existante, la protection a été renforcée. Pour empêcher tout risque le tablier a été enveloppé par une double épaisseur de bâche thermo-rétractable créant ainsi un confinement étanche (figure 17).



Figure 17 : Confinement du pont

Ce confinement principal est ensuite subdivisé en confinement secondaire, afin que les ouvriers chargés des travaux de génie civil ne soient pas en contact avec l'équipe chargée du sablage. En effet, les compagnons chargés du décapage accèdent à leur zone de travail par l'intermédiaire d'un sas d'entrée/sortie dans lequel ils peuvent se changer et se doucher (l'eau des douches est récupérée pour être ensuite traitée). Les sas secondaires sont maintenus en dépression pour éviter toute fuite de déchets vers l'extérieur et les compagnons sont munis de masques respiratoires leur permettant un apport d'air sain en permanence.

Dans le cadre de la protection de l'environnement, les 600 tonnes d'abrasifs utilisés pour décapier la peinture sont amenés dans un sas de récupération des déchets, présents sur chaque rive de la Seine. Ils sont ensuite mis dans des sacs étanches et sont envoyés à un centre agréé pour la prise en charge des DIS (Déchets industriels spéciaux). Durant le chantier, de l'amiante a été découverte à l'intérieur des caissons, présente dans le brai bitumineux ; elle a été retirée avec les mêmes précautions que pour les abrasifs.

4 – Techniques de construction d'un pont mixte

Ce paragraphe présente les techniques de construction utilisées pour construire le pont Jeanne d'Arc de Rouen (1954-1956).

4.1 - Construction des piles

Les fondations superficielles en site aquatique posent surtout des problèmes d'exécution. Devant être exécutées à sec, il convient de les réaliser à l'intérieur d'une enceinte étanche. Il existe plusieurs techniques permettant de créer cette enceinte. Lorsque la hauteur d'eau reste modérée, on exécute des batardeaux* souvent à partir de palplanches* métalliques (figure 18).

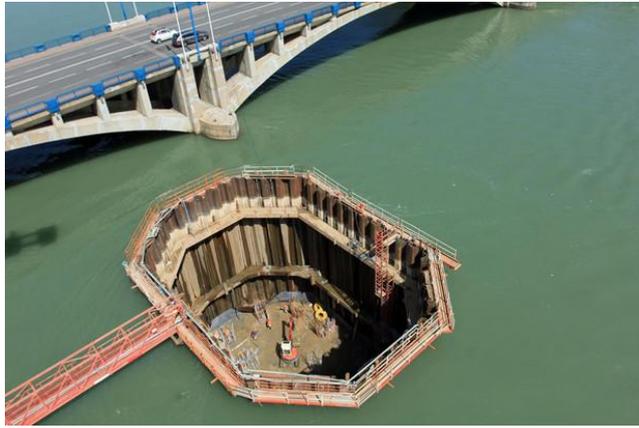


Figure 18 : Construction du pont Raymond Barre à Lyon dédié au tramway, à gauche vue de la pile 1 et du batardeau en avril 2013, image SYTRAL [6]

Pour des hauteurs d'eau plus importante, on peut employer la technique des caissons havés. Le procédé consiste à foncer*, par havage* à l'air libre ou à l'air comprimé, une enceinte creuse, le caisson, que l'on fait descendre jusqu'à un substratum résistant (pour le pont Jeanne d'Arc, des marnes calcaires bleues). Cette technique est intéressante si le substratum correspondant au niveau de fondation est surmonté par une couche d'alluvions sablo-graveleuses (pour le pont du sable calcaire et siliceux). Les matériaux sablo-graveleux sont extraits de l'intérieur du caisson et évacués tandis que le caisson est foncé sous l'action de son poids propre. Donc la principale force qui oppose une résistance est le frottement latéral et il est important dans les sols très frottants ou à forte cohésion à court terme.

La figure 19 montre la coupe schématique d'un caisson à air comprimé, technique qui a été employée sur le chantier du pont Jeanne d'Arc. Le caisson est fabriqué sur la berge puis amené au niveau de la future pile. Pour améliorer le fonçage, la partie basse du caisson est souvent munie d'un couteau légèrement évasé pour ouvrir une fouille de diamètre légèrement supérieur à celui du caisson. Une fois en place, on insuffle de l'air comprimé à l'aide de grandes pompes pour évacuer l'eau à l'intérieur. Ainsi les ouvriers peuvent descendre dans la chambre hyperbare (la pression est maintenue à 3 ou 4 bars) et creuser au sec. Une fois le substratum atteint on remplit ce caisson de béton.

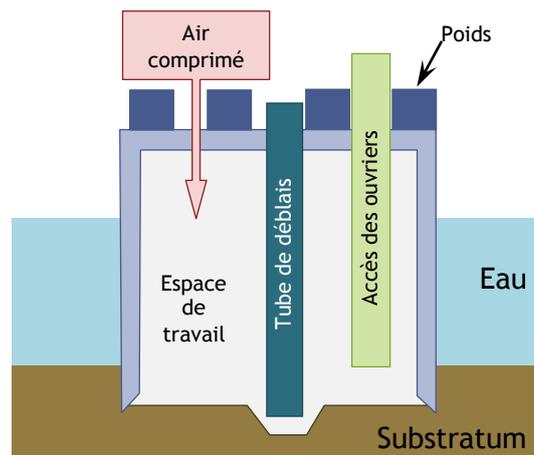


Figure 19 : Schéma d'un caisson à air comprimé

La technique des caissons pressurisés tend à disparaître de part le risque sur la santé des ouvriers travaillant en condition hyperbare ; elle a été remplacée par la technique des caissons havés à l'air libre pour les faibles hauteurs d'eau ou les fondations sur pieux pour les hauteurs d'eau plus importants.

4.2 - Construction du tablier

Les sept poutres métalliques qui constituent le tablier ont été réalisées chacune en usine en trois parties : deux tronçons en fléau* de 78 mètres axés sur les piles* et un tronçon central de 40 mètres. Ils ont été mis en place à l'aide de digues flottantes sur la Seine. Pour raccorder le tronçon central aux deux tronçons latéraux, on soude d'abord un plat (en bleu sur la figure 20) entre les âmes de ces poutres qui les maintient. Puis on soude les deux poutres au niveau du joint de montage, autour du plat, qui est retiré pour terminer complètement cette soudure quand la fixation est suffisante.

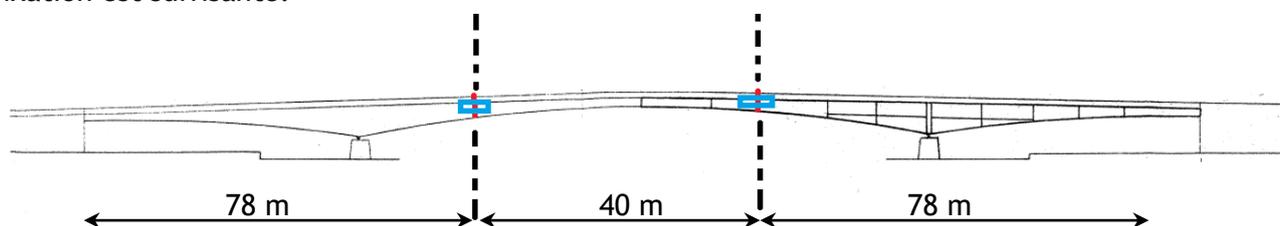


Figure 20 : Schéma du montage des poutres principales

Les entretoises ont ensuite été soudées entre les poutres métalliques tous les sept mètres environ pour minimiser les déplacements des poutres en acier et donc le risque de déversement. On peut alors venir placer les dalles préfabriquées en béton armé sur les poutres métalliques qui vont servir de coffrage pour couler le hourdis. Elles sont mises en place à partir du centre vers les culées. L'utilisation de dalles préfabriquées et d'un béton relativement sec par rapport aux bétons utilisés actuellement a permis d'éviter le phénomène de fissuration au niveau des piles, qui est un problème important pour ce type de ponts.

Ce type de conception présente d'autres avantages comme une durée de construction réduite, l'accroissement de la qualité des éléments préfabriqués en béton armés et coulés en atelier, les conditions de travail meilleures pour les ouvriers lors de l'installation du coffrage, des armatures et du coulage.

5 – Conclusion

Ce projet s'inscrit dans la logique de développement durable, en effet il s'agit de prolonger la durée de vie d'une structure ancienne et de l'adapter à ses nouvelles fonctions. Le renforcement du pont Jeanne d'Arc permet de visualiser un projet concret dans sa globalité et son évolution ; il permet aussi d'apprécier l'évolution des techniques de constructions. Deux études de cas issues de cette étude sont proposées « *Fatigue de la charpente métallique d'un pont mixte* » et « *Influence des dénivellations d'appuis d'un pont mixte* ».

Références :

[1]: <https://structurae.info/>

[2]: Dépalle, Etienne et al., « Le pont Jeanne d'Arc à Rouen renforce son tablier et se refait une beauté », Travaux, 886, janvier-février 2012, pp. 72-75

[3]: http://www.setec.fr/societe/setec_tpi.html

[4]: <http://www.tpi.setec.fr/FR/050-rd/pythagore.php>

[5]: <http://ac4s.fr/>

[6]: <http://www.sytral.fr/>

[a]: Géotechnique : exercices et problèmes corrigés de mécanique des sols avec rappel de cours, C. Desodt, P. Reiffsteck, Editions Dunod

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>