PASSERELLE DU GRAND LARGE
ENTRE LE TREILLIS ET LA PASSERELLE HAUBANÉE

Julie GAUBERT – Jean-Bernard DATRY

setec tpi

La passerelle du Grand Large, située dans le quartier du même nom à Dunkerque, relie une ancienne friche en court de réhabilitation à Malo-les-Bains, centre touristique et balnéaire de la ville. Sa silhouette multi-haubanée résonne avec l'athmosphère maritime du lieu.

Introduction

En 1969, la commune de Malo-les-Bains est rattachée à la ville de Dunkerque, et devient l'un de ses quartiers. Elle jouxte les chantiers navals alors florissants. Dans les années 1980, l'activité navale périclite et les chantiers ferment, laissant près de 150 hectares de terrains en friches.

Piloté notamment par S3D (Société de Développement du Dunkerquois), un plan d'urbanisation vise à reconquérir cet espace perdu. Dès les années 1990, de nouveaux quartiers sont construits sur l'ancien territoire du port, de nouvelles infrastructures, tels des ponts levant, permettent de concilier la nouvelle urbanisation et l'usage du port.

La dernière parcelle de terrain encore non construite, renommée quartier du Grand Large, est aujourd'hui en pleine transformation. De nombreux logements basse consommations y ont été construits, les friches transformées en espaces publiques. La halle AP2, surnommée « la cathédrale » par les riverains, dernier vestige du passé industriel du quartier, a été transformée en espace d'exposition. Une structure jumelle, dont la façade est une enveloppe gonflable en ETFE, y a été accolée. Cet ensemble, dessiné par les architectes Lacaton et Vassal, accueille le Fond Régional pour l'Art Contemporain (FRAC). Toutefois, ce nouveau quartier est séparé du centre de Dunkerque par le port, et de la plage et du quartier commerçant de Malo-les-Bains par le canal exutoire, qui régule le niveau d'eau des wateringues - réseau de canaux de l'arrière-pays dunkerquois et calaisien.

La communauté urbaine de Dunkerque décide alors de la construction d'une passerelle piétonne, lien symbolique et physique entre ces pôles culturels et balnéaires, et qui contribuera au désenclavement du quartier. Elle permettra à ses habitants de limiter l'usage de la voiture et de rejoindre à vélo ou à pied le front de mer.

Contexte et choix de la solution

Tracé et contexte

La passerelle relie la rue intérieure du FRAC, située au premier étage du bâtiment, à la digue des Alliés, en prolongement de la promenade du front de mer de Malo-Les-Bains. Une première passerelle de 103 m de long, franchit d'abord le parvis du FRAC pour atterrir sur une butte. Une deuxième passerelle, d'une longueur totale de 180 m, s'incurve avant de franchir le canal en biais.

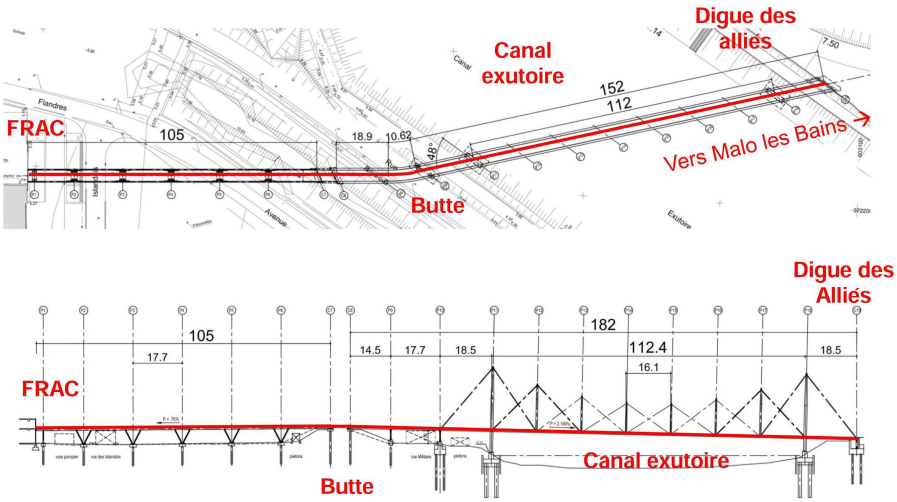


Fig.1 : Profil et vue en plan

La butte, à la jonction des deux passerelles, a été réaménagée pour permettre de rejoindre en douceur le parvis et les autres chemins piétons situés 5 m en contre-bas des deux passerelles.

Choix de la structure du franchissement

Le groupement de maîtrise d'œuvre, constitué de setec tpi pour la structure et de l'architecte Brigit de Kosmi, a proposé deux structures différentes mais liées architecturalement pour réaliser les deux passerelles. Pour la passerelle franchissant le canal, étant donnés la portée, les gabarits et la nature du sol, seules les solutions portées « par le dessus » et auto-ancrées horizontalement pouvaient convenir. La solution d'un treillis a également été rejetée car elle aurait marqué trop fortement le paysage.

Deux solutions plus classiques, la première suspendue, portées par deux mâts symétriques placés de chaque côté du canal ; et la deuxième haubanée, ont été proposées, mais finalement non retenues : le mât de la passerelle haubanée, trop haut, aurait concurrencé le FRAC, tandis que la passerelle suspendue a été jugée trop lisse. Une structure plus originale a finalement été choisie : une passerelle haubanée à plusieurs mâts, et dont les haubans se croisent, comme les diagonales d'une poutre treillis. Le comportement global de la structure est d'ailleurs celui d'une poutre treillis, dont on aurait retiré la membrure supérieure, alors que la hauteur de ses mâts varie selon une courbe qui rappelle la chaînette d'une structure suspendue.

L'ambiance portuaire et maritime du lieu, la présence des bateaux à voiles de la proche marina est rappelée par les multiples mâts et haubans, comme si un gigantesque navire était venu mouiller dans les eaux du canal exutoire.

Fig.2 : Vue de la passerelle, depuis la digue des alliés

Cette structure rappelle celle des poutres Fink, utilisée à la fin du 19ième siècle, majoritairement pour des ponts ferroviaires, et c'est pourquoi elle a été nommée « poutre Fink inversée ».

Fig.3 : Pont Bolivar – Arequipa (Perou) – 1882 – conçu par Gustave Eiffel

La poutre Fink inversée diffère des poutres qui l'ont inspirée par son comportement hyperstatique. Afin de d'adapter le bras de levier de la poutre à la courbe des moments, la hauteur des mats doit suivre une courbe parabolique.

La hauteur des mâts de rive est de 23 m, respectant le ratio habituel hauteur de mâts/portée des ponts haubanés, et la distance entre les mâts de 17 m, ce qui permet une inclinaison optimale de tous les haubans. Les mâts sont situés sur deux plans latéraux, afin de libérer le passage des piétons et de limiter les efforts transversaux dans les mâts. Les mâts fonctionnent deux à deux, grâce aux pièces-de-pont renforcées qui les relient, formant ainsi une série de U qui rigidifient transversalement le pont. A cause du franchissement en biais, les U forment un angle de 45° avec l'axe de la passerelle.

Fonctionnement

Sous charge répartie, la structure est soumise à un moment de flexion positif en travée, et négatif sur appui, ce qui signifie que les haubans, qui jouent à la fois le rôle de membrure supérieure et de contreventement, sont tendus sur appuis, et comprimés en travée.

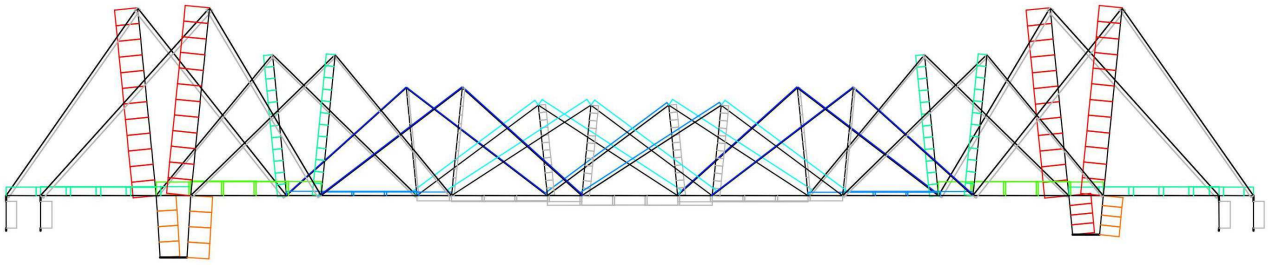


Fig.4 : Eléments comprimés sous poids propre

Afin de garantir la stabilité de la structure, il faut donc pré-contraindre les haubans, ce qui a pour effet d'augmenter le moment en travée pour le rendre négatif et par conséquent tendre les haubans centraux.

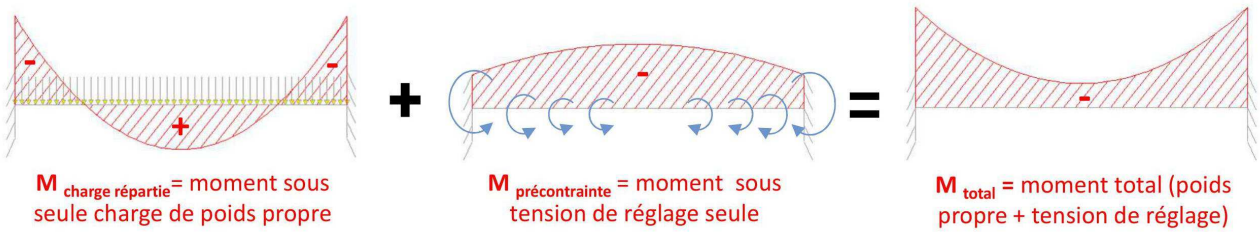


Fig.5 : Moment global dans la structure

Le principe de réglage est le suivant :

- On tend les haubans bleus pour redresser les têtes de mâts
- On tend les haubans rouges pour ramener le tablier sur la ligne non déformée

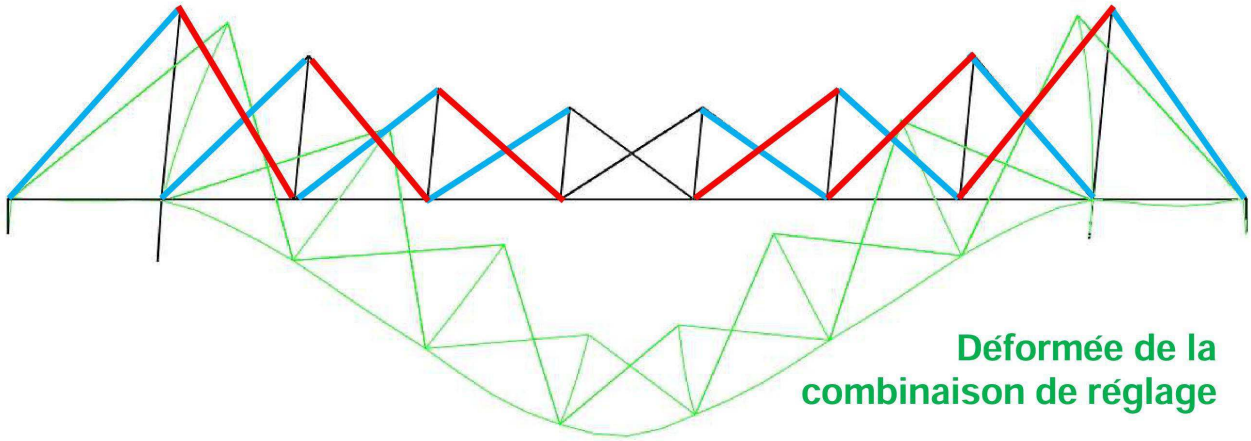


Fig.6 : Réglage des haubans

Numériquement, la méthode est exactement celle utilisée pour déterminer le réglage des ponts à haubans :

- On calcule une matrice d'influence A qui relie la tension de chaque hauban au déplacement des points qui nous intéresse,
- On multiplie le vecteur déplacement cible D, qui est le déplacement qui annule la déformée de la passerelle, avec l'inverse de la matrice d'influence A^{-1}, pour obtenir la tension à appliquer à chaque hauban.

La combinaison de réglage est 1.15 (G+G') +1.15Q, ce qui permet de s'assurer qu'aucun hauban n'est comprimé à l'Etat Limite de Service.

A l'Etat Limite Ultime, afin de limiter la précontrainte du système, on autorise une détente des haubans centraux. Sous certaines combinaisons de charges, un calcul à chargement incrémenté a été nécessaire.

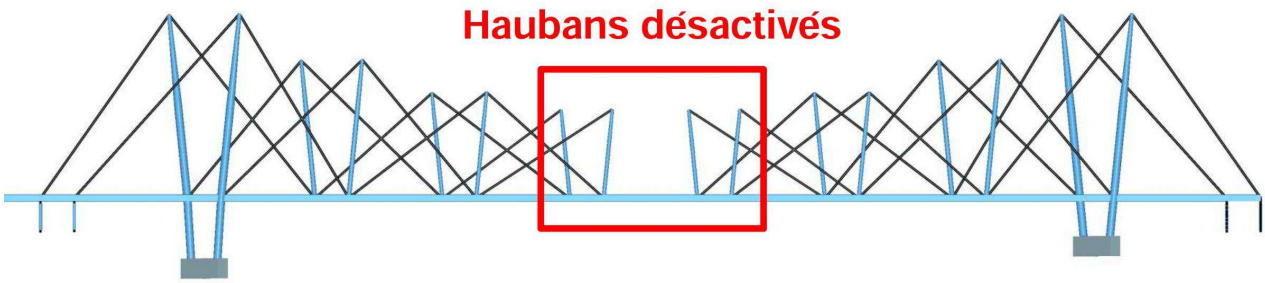


Fig.7 : Comportement de la structure à l'ELU

Au-delà d'une certaine valeur de chargement, la tension s'annule dans les haubans centraux et les haubans adjacents. Ils sont alors désactivés pour les pas de calcul suivants, et la structure se comporte alors comme deux consoles.

Géométrie

Pylônes et mâts

Les pylônes sont des tubes en acier de 1 016 mm de diamètre s'affinant en tête. La géométrie des mâts secondaires est similaire, mais leur diamètre varie de 510 à 610 mm. Les mâts sont encastrés dans le tablier, et inclinés vers l'extérieur du tablier. Les haubans y sont ancrés en tête et en pied par le biais de tôles épaisses, qui transmettent les efforts apportés par les haubans par cisaillement. Les chapes traversent les mâts, ce qui permet une transmission directe des efforts horizontaux.

Fig.8 : Vue des mâts depuis le platelage

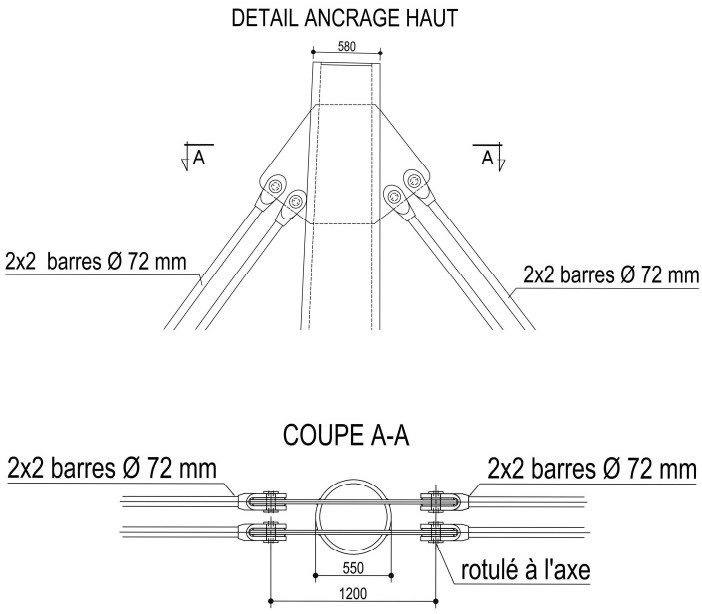


Fig.9 et 10 : Détail d'accroche des haubans

Système de haubanage

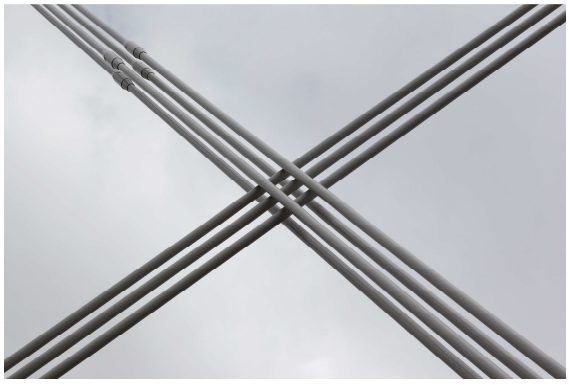


Fig.11 : Croisement des haubans

Le système de haubanage est situé de part et d'autre du platelage, et est constitué de barres pleines en acier de 72 mm de diamètre et de nuance S540, dont le nombre varie en fonction de la position sur la travée : quatre barres sont nécessaires pour les haubans de retenue, une ou deux barres pour les haubans centraux. Les barres sont bi-articulées et ancrées en tête et pied de mâts. Des manchons de réglage permettent l'ajustement des longueurs. L'utilisation de barres pleines en nombre variable permet de régler le problème des croisements des haubans sans décaler leur centre de gravité.

Le tablier

Le tablier est constitué de deux longerons latéraux en acier en caissons, de 80 cm de haut et de 70 cm de large, reliés entre eux tous les 4 m par des pièces de pont (profilés de type IPE en zone courante ou PRS au niveau des mâts). Ces pièces de pont supportent des solives de type IPE et UPN 180, espacées de 0,5 m. Le platelage en bois (maçaranduba, classe biologique 4) est fixé à des lambourdes de la même essence, elles-mêmes fixées sur les solives. Le contreventement est assuré par des tubes disposés en « K ».

Fig.12 : Sous-face du tablier

Les appuis

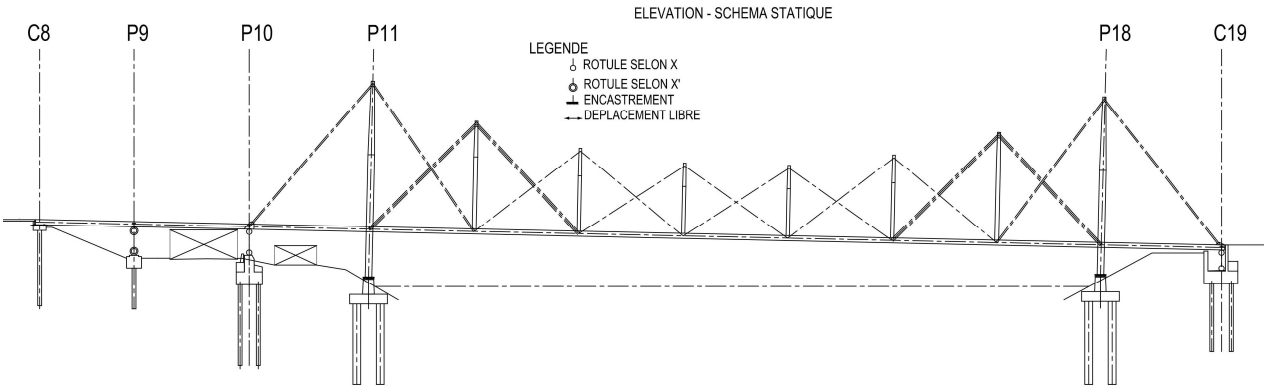


Fig.13 : Schéma statique

Les pylônes (P11 et P18), sont encastrés en pied dans des massifs en béton armé. Pour éviter que la dilatation thermique ne cause un moment trop important dans les fondations, les massifs et les sections de pylône à l'encastrement ont été minimisés afin d'apporter de la souplesse.

Les efforts apportés par les haubans de retenue sont repris horizontalement par le tablier, et par deux bielles articulées (C19 et P10). En C19, les efforts de soulèvement sont contrebalancés par le poids de la culée. En P10, c'est le poids des travées de rive, ainsi qu'un lest en béton au niveau des fondations qui jouent ce rôle.

Au niveau de la culée C8, la passerelle est simplement appuyée.

Les fondations

Les pylônes sont fondés chacun sur trois barrettes de dimensions 0,6 m x2,8 m et de 9 m de profondeur.

Les piles P9, P10 et la culée C19 sont fondés sur des pieux de 0,6 m de diamètre et de profondeur variant de 7 à 12 m. Ces pieux ont été réalisés à la tarière creuse.

La culée C8 est fondée sur micropieux.

Les amortisseurs

Les calculs effectués en phase de conception selon les recommandations du guide méthodologique du SETRA « passerelles piétonnes – Evaluation du comportement vibratoire sous l'action des piétons », donne les accélérations suivantes :

- L'accélération verticale maximale est égale à 2.08m/s², supérieure à la limite de 1 m /s², recommandée par le guide du SETRA. L'installation d'amortisseurs verticaux se révèle indispensable.
- L'accélération horizontale maximale est égale à 0.106 m/s², supérieure de 6 % à la limite de 0.1 m/s². L'accélération est proche de la limite, mais par sécurité et pour le confort des usagers, des amortisseurs seront installés.

Des essais dynamiques ont été effectués après la construction. Une première série d'essai a permis de déterminer les fréquences propres de la passerelle. Les modes en mesure d'être excités par le passage des piétons sont les suivants :

1) Mode horizontal, de fréquence 0.71 Hz (0.69 Hz calculé). C'est le mode horizontal principal
2) Mode horizontal et de torsion, de fréquence 1.22 Hz (1.17 Hz calculé).
3) Mode horizontal, de fréquence 1.48 Hz (1.42 Hz calculé)
4) Mode vertical, de fréquence 1.70 Hz (1.71 Hz calculé). C'est le mode vertical principal

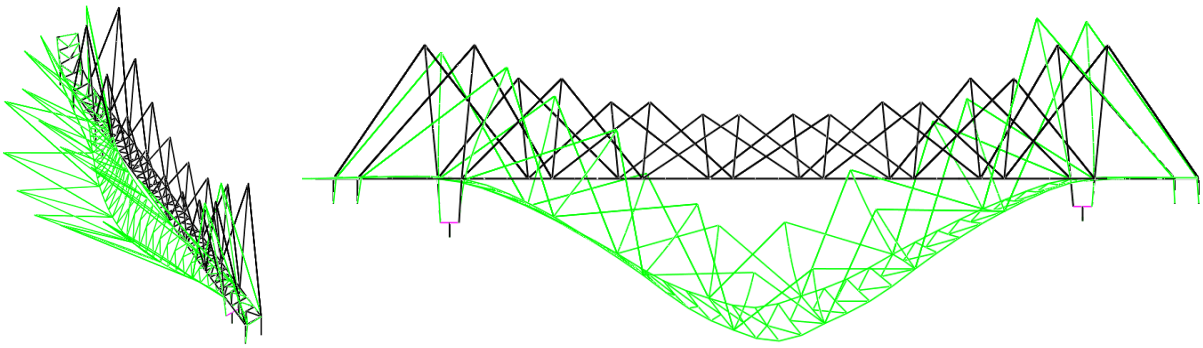


Fig.14 et 15 : Mode horizontal principal (à gauche) et mode vertical principal (à droite)

Les données mesurées lors de ces essais permettent de dimensionner les amortisseurs dynamiques accordés. Ceux-ci sont positionnés sous le tablier au milieu de la travée principale, au milieu de la section pour les amortisseurs horizontaux et le long des caissons latéraux pour les amortisseurs verticaux, afin de reprendre la torsion.

Fig.16 : Amortisseurs dynamiques accordés

D'autres essais, avant et après la pose des amortisseurs, ont permis de mesurer les accélérations sous des excitations verticales et horizontales par des groupes de piétons. Ces tests consistent à marcher ou à sauter de manière coordonnée aux fréquences propres de la structure.

Les accélérations avant et après pose des amortisseurs sont comparées, afin de vérifier leur efficacité. Pour le mode vertical, plus sensibles, les accélérations sont divisées par 6. Pour les modes horizontaux, les accélérations sont divisées par 2 ou 4, selon les modes propres concernés.

La construction

L'entreprise Bouygues Travaux Publics Régions France a réalisé les fondations et le génie civil, tandis que la charpente métallique a été réalisée par l'entreprise Belge Victor Buyck Steel Construction.

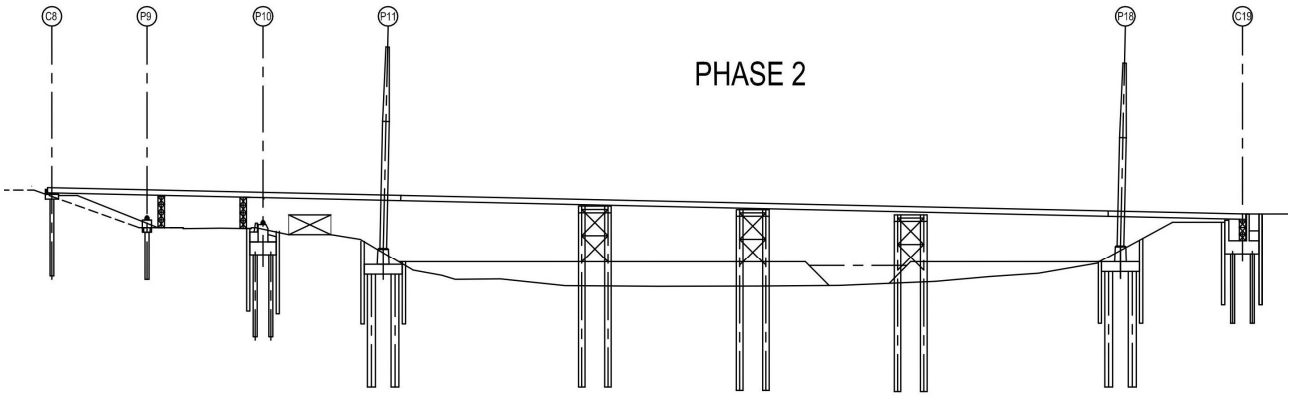
Le montage de la charpente métallique a été réalisé sur appui provisoire. La pose des éléments s'est effectuée à la grue, par le biais d'une digue provisoire, cette digue provisoire étant ouverte pour assurer la transparence hydraulique du canal.

Après réalisation des fondations et appuis bétons, le montage a duré six mois. Les principales phases de montage ont été les suivantes :

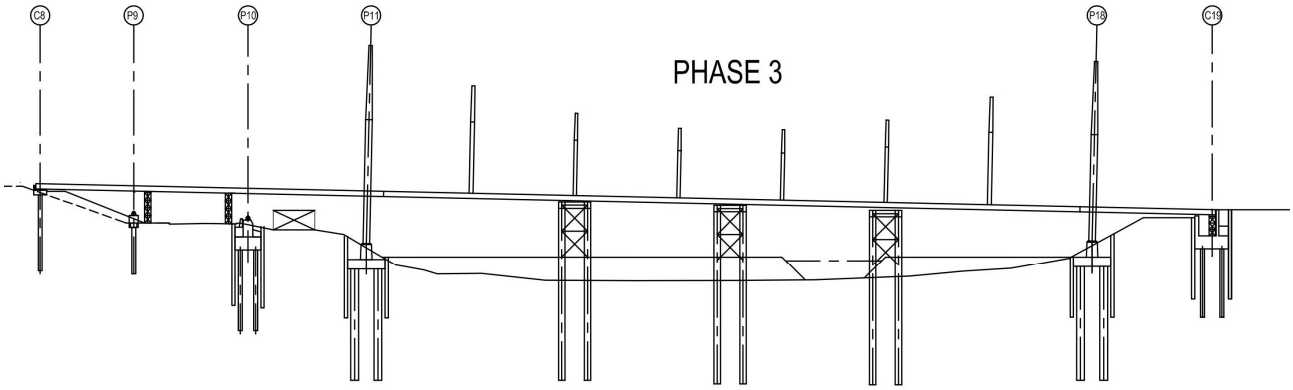
Phase 1 :
Les longerons des travées de rive sont mis en places et appuyés sur des appuis provisoires

Fig.17 : Montage des caissons latéraux du tablier

Phase 2 : La travée centrale est mise en place sur palées provisoires. Les pièces-de-pont et les solives sont assemblées.



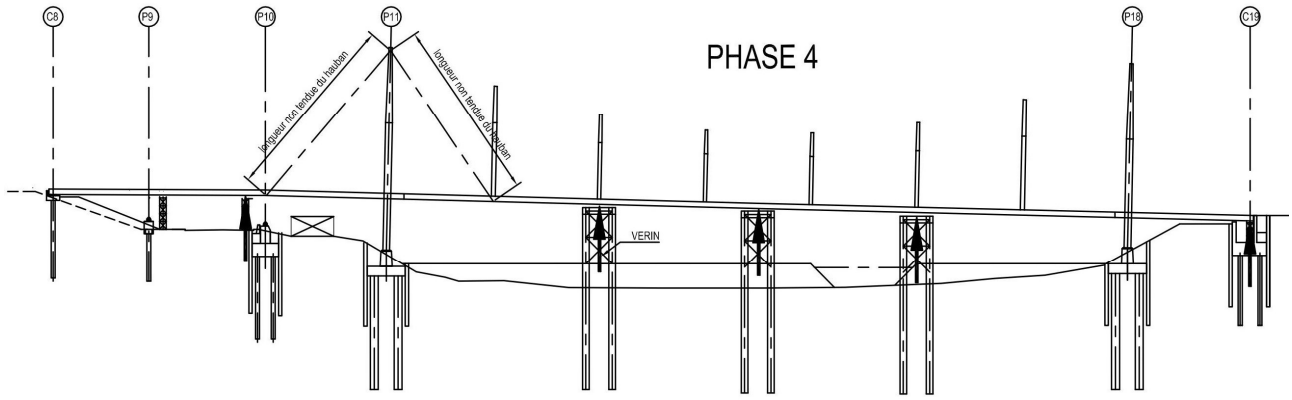
Phase 3 : Les mâts sont mis en place et soudés. Le platelage en bois est posé.



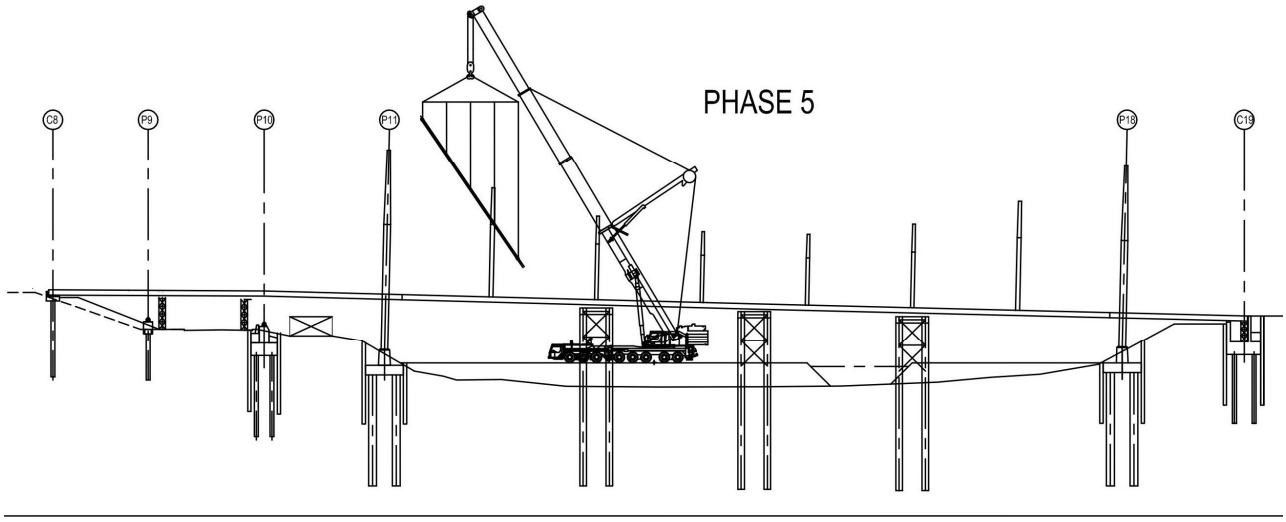
Le réglage des barres par manchons repose entièrement sur la géométrie de construction et le phasage de pose. Un calcul phasé donne à chaque étape d'installation la tension et l'allongement de la barre.

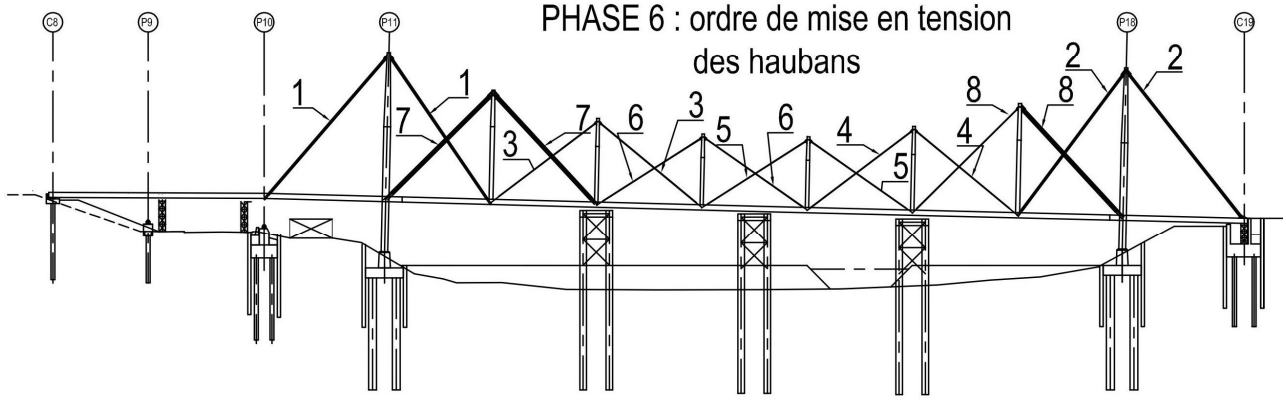
Phase 4 :

- On calcul la longueur neutre, non tendue, du hauban à chaque étape d'installation, par un calcul phasé
- Sur chantier, les barres sont coupées et réglées à la longueur neutre à l'aide de manchon filetés
- Le tablier est vériné à chaque étape sur les appuis provisoires, afin que la distance entre les points d'accroche en tête et en pied de mât corresponde exactement à la longueur neutre des haubans.

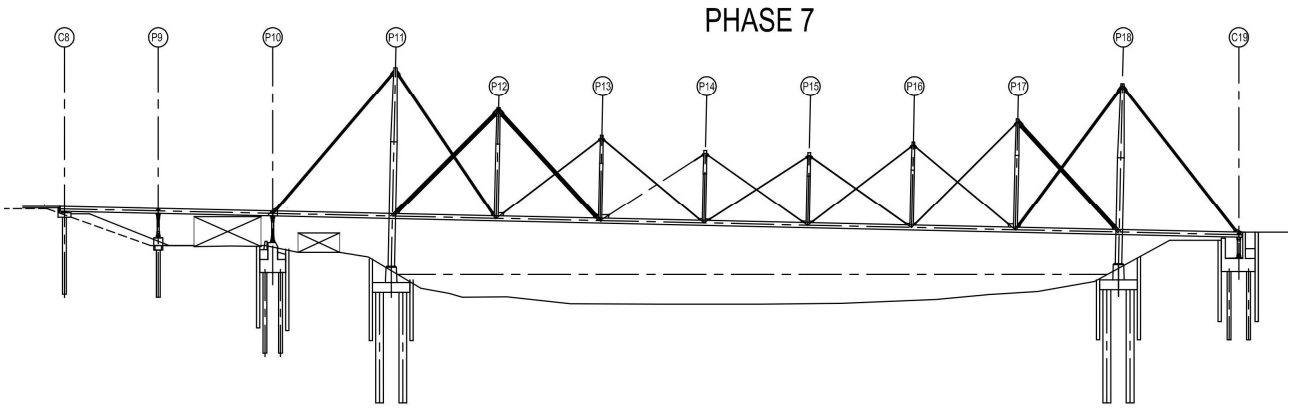


Phases 5&6 : Les haubans sont montés simultanément de chaque côté d'un mât, à l'aide d'un palonnier. Ce palonnier permet de neutraliser la déformée sous poids propre de la barre.





Phase 7 : Les béquilles bi-articulées sont mises en place, les appuis provisoires et la digue sont déconstruits.



Conclusion

Grâce à une bonne synergie entre architecture et structure, il a été possible de concevoir et réaliser une passerelle à l'architecture inhabituelle et osée, qui s'intègre pourtant parfaitement à son environnement d'ancien chantier naval.

La passerelle, livrée en mai 2015, a été adoptée par les habitants du quartier du Grand Large, et en est devenu un symbole. Elle est devenue un lieu de promenade, empruntée tant par les joggers que les cyclistes, et les nombreux « cadenas de l'amour » qui y fleurissent avant d'être cisaillés par les services municipaux sont la preuve de son succès.