

LE PONT GUSTAVE FLAUBERT À ROUEN

Frédéric CARMILLET¹

DDE 76

Bernard GAUSSET, Michel MOUSSARD

Arcadis

Jean-Pierre GHILARDI

EURODIM

Claude SERVANT²

Eiffage TP

Michel VIRLOGEUX

Consultant

Aymeric ZUBLENA

Architecte

1. UNE GENÈSE DIFFICILE

1.1. Nécessité d'un franchissement à l'ouest de l'agglomération

Nécessité reconnue par les acteurs institutionnels, le principe d'un sixième franchissement de la Seine à Rouen se trouvait déjà inscrit dans le schéma directeur d'aménagement d'urbanisme approuvé en 1972 dans le cadre d'une liaison Nord-Sud à l'ouest de l'agglomération reliant l'autoroute A150 à l'autoroute A13.

Cette liaison doit permettre :

- d'améliorer l'environnement urbain en déchargeant les quartiers ouest de l'agglomération d'un trafic important de transit et d'échange (trafic attendu sur l'ouvrage : environ 50.000 véhicules par jour, dont 9% de poids-lourds).
- de fluidifier le trafic dans la traversée de l'agglomération (le projet est d'ailleurs intégré au plan de déplacement urbain),
- de développer les activités économiques et favoriser les échanges inter-régionaux.

Cette liaison a débuté par la réalisation de l'autoroute A150 au nord de Rouen.

Au sud, la liaison avec l'autoroute A13 s'est terminée avec la mise en service en 2003 de la dernière section de la RN 338 (liaison SUD III).

Restait donc le raccordement entre les deux rives. Après étude, c'est un tracé proche de la ville qui a été retenu, ce qui a posé des difficultés importantes d'insertion urbaine.

1.2. Le problème de franchissement de la Seine et du gabarit

Le choix entre un tunnel et un pont a pendant de nombreuses années semblé insoluble :

- La solution tunnel, la moins contraignante pour l'activité nautique sur la Seine, présentait de nombreux inconvénients : coûts élevés (construction et exploitation), conditions d'exploitation réglementées pouvant conduire à maintenir un trafic poids lourd sur les ponts existants, éloignement des échangeurs de plusieurs centaines de mètres par rapport aux rives de la Seine dû à la profondeur d'enterrement du tunnel, aléas techniques.
- La solution pont fixe (à gabarit fluvial, soit 7 mètres au dessus des Plus Hautes Eaux Navigables (PHEN)) ne pouvait être retenue car elle ne permettait pas de maintenir le terminal croisière existant à proximité du centre ville et empêchait d'organiser l'Armada (grand rassemblement de voiliers) au cœur de la ville.
La solution pont fixe à gabarit maritime (de type pont de Normandie, soit 55 mètres au dessus des PHEN) posait quant à elle des difficultés d'insertion dans le site compte-tenu de la proximité de la ville.

¹ Chef du service Etudes et Grands Travaux de la DDE 76 à l'époque des travaux

² Directeur technique du BE SERF lors du concours de maîtrise d'œuvre en 1999

De ces contraintes apparemment incompatibles, le pont levant est apparu comme un compromis permettant de concilier activités nautiques, ouvrage de proximité et insertion urbaine.

Il permet en effet de conserver au cœur même de la ville le déroulement de manifestations maritimes de renommée mondiale ainsi qu'une activité croisière.

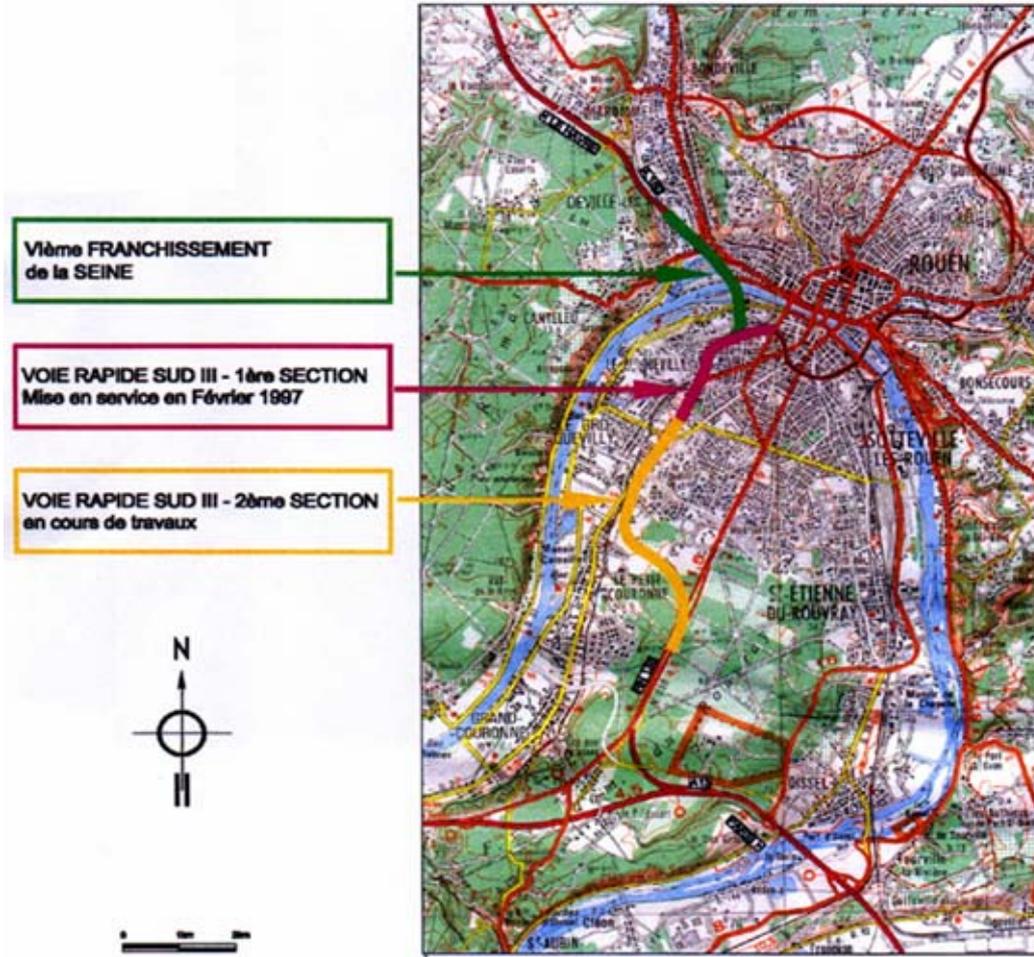


Figure 1 : Agglomération de Rouen et liaisons autoroutières

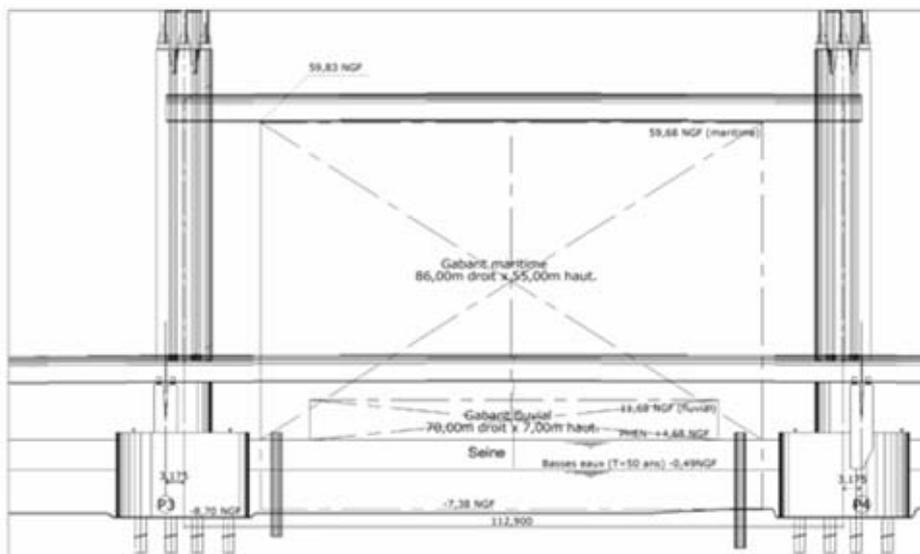


Figure 2 : Gabarits de navigation



2. LE CONCOURS DE MAÎTRISE D'ŒUVRE

Compte-tenu de la haute technicité requise pour l'ouvrage et de son fort impact visuel, le choix a été fait de lancer un concours de maîtrise d'œuvre, afin de favoriser la créativité technique et architecturale.

Il faut noter que le choix du maître d'ouvrage d'imposer deux tabliers devant se lever indépendamment l'un de l'autre pour des raisons d'exploitation (afin de garder la possibilité de circuler dans les deux sens sur une seule travée levante si maintenance longue sur l'autre) a été une forte contrainte pour la conception.

En effet, cela a automatiquement exclu les solutions avec un tablier levant unique, et rendu peu compétitive toute solution avec un pylône central (du fait des différences de charge s'appliquant sur le pylône si un des tabliers n'est pas à la même hauteur).

Des quatre propositions présentées, le jury, comprenant le maître d'ouvrage et des élus locaux, a retenu en décembre 1999 le projet du groupement de concepteurs EEG SIMECSOL (devenu Arcadis) – Michel Virlogeux – Aymeric Zublena – EURODIM – SERF.



Figure 5 : Vue d'ensemble du projet retenu

Au sein de ce groupement, les rôles étaient les suivants :

- bureau d'étude Structure Pont levant : Arcadis
- bureau d'étude mécanismes : Eurodim
- bureau d'étude Structure Viaducs d'accès : Serf
- Architecte : A.Zublena
- Consultant : M.Virlogeux

Mission confiée au lauréat

La mission confiée au lauréat du concours est une maîtrise d'œuvre particulière d'études pour le pont levant et les viaducs d'accès. Elle comprend les éléments avant-projet, projet, assistances pour la passation des contrats de travaux et visa des plans d'exécution, ainsi qu'une mission de suivi de chantier pour la partie mécanismes.

3. LA CONCEPTION DU PONT LEVANT

3.1. Principes généraux des concepteurs

Compte-tenu de la proximité de la ville et des activités portuaires, les concepteurs ont privilégié simplicité et légèreté pour l'ouvrage.

Cela a permis une meilleure inscription dans le site mais aussi d'assurer un fonctionnement structurel sain et de maîtriser les coûts de construction et de maintenance.

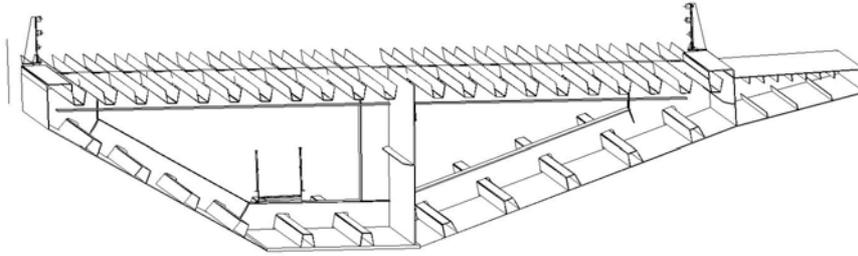


Figure 6 : Schéma du caisson du tablier levant

Le volume des pylônes et de tous les équipements de levage en tête (« papillons ») a ainsi été optimisé, avec des formes et des structures très simples, qui ne sont soumises qu'à des efforts de compression (en dehors des effets du vent).

Cela a conduit les concepteurs à :

- dédoubler les pylônes de chaque rive pour alléger l'aspect général,
- insérer quand cela était possible les éléments mécaniques dans les socles (appuis en Seine, servant de base aux pylônes) pour limiter la taille des éléments visibles au-dessus de l'eau,
- retenir le principe de levage par câbles, avec des câbles apparents,
- optimiser et affiner la géométrie des têtes de pylônes, leur donnant cet aspect de « papillon » en excentrant notamment les poulies par rapport aux pylônes.

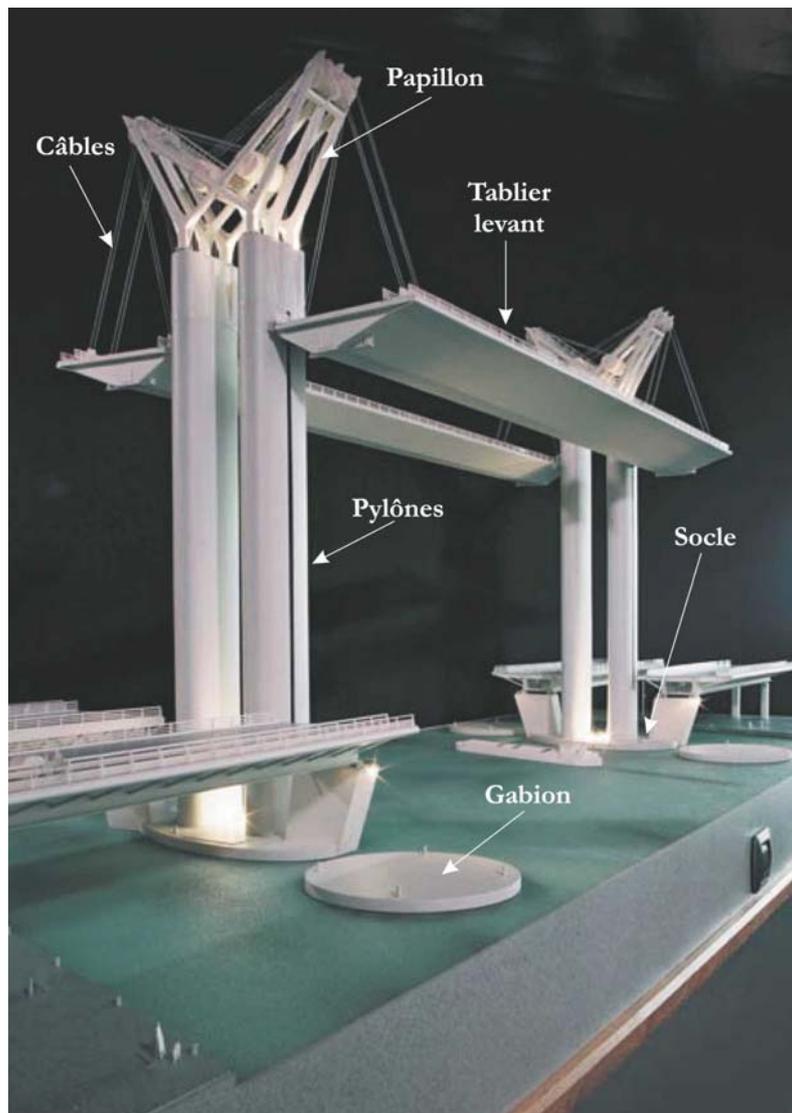


Figure 7 : Eléments constitutifs de l'ouvrage



3.2. La protection contre les chocs de bateau : les gabions

Le calage définitif du tracé positionne l'ouvrage dans une courbe de la Seine, ce qui rend la navigation entre les appuis de l'ouvrage plus délicate.

Des études trajectographiques précises ont donc été réalisées pour simuler le passage de bateau.

Elles ont montré la nécessité de prévoir des ouvrages de protection contre les chocs de bateau. Quatre gabions ont donc été ajoutés au projet.

Ils sont constitués de cylindres de béton de 16 mètres de haut, de 20 mètres de diamètre avec des voiles d'un mètre d'épaisseur remplis de matériau ayant une densité élevée.

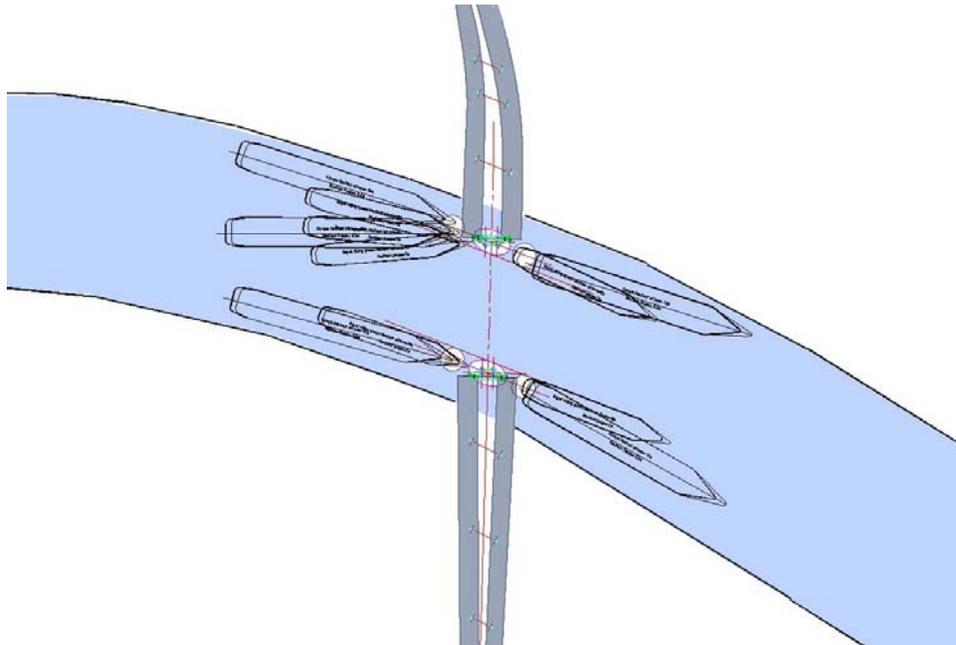


Figure 8 : Simulations de trajectoires de bateaux

3.3. La conception du système de levage

Le système de levage repose sur des principes très simples et robustes :

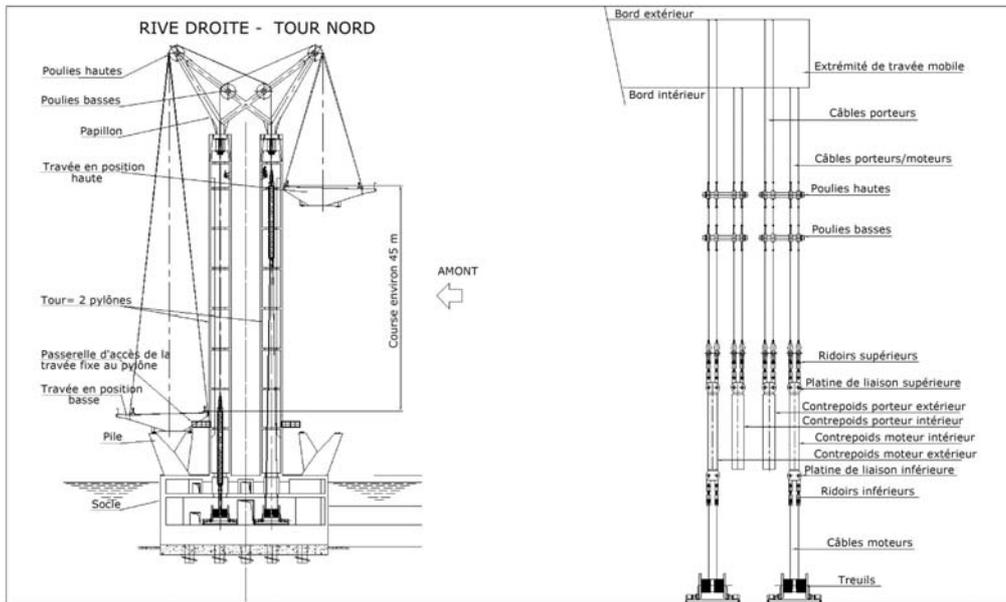
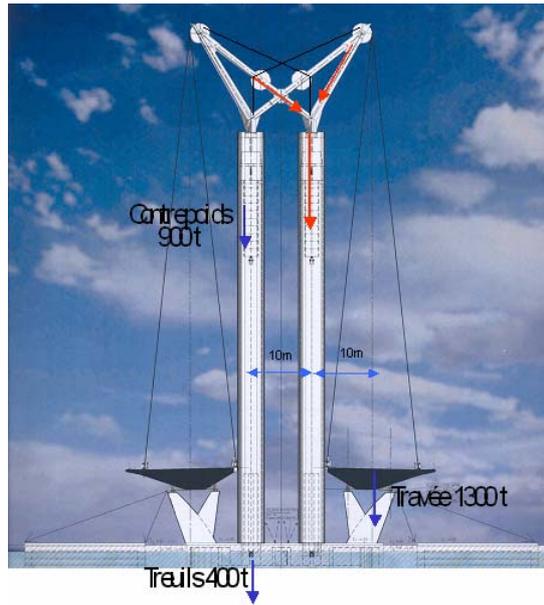
- chaque tablier de 1300 tonnes est relié à une série de 16 câbles;
- par un système de renvois de poulies (2 poulies pour chaque câble), le câble est renvoyé dans le pylône opposé à la travée (cf. flèche bleue sur figure 9 ci-après);
- les câbles sont reliés à des systèmes de contrepoids (de 900 tonnes environ) dans le pylône opposé;
- une partie des contrepoids est reliée à l'aide d'autres câbles (câbles moteurs) à des treuils situés dans le socle;
- la travée est levée par enroulement des câbles moteurs sur les tambours de treuils, et guidée par un rail le long du pylône.

Il est prévu environ 30 levages par an.

3.4. Conception et fonctionnement des câbles

Les câbles constituent un des éléments essentiels de l'ouvrage, et une partie d'entre eux sont à l'air libre. Leur conception et leur utilisation ont donc fait l'objet d'une attention toute particulière :

- Les câbles extérieurs ont un diamètre de 85mm et sont composés de 8 torons extérieurs avec un noyau central.
- Ils ont reçu une imprégnation plastique spéciale ainsi qu'une infiltration plastique.
- Tous les câbles sont doublés et fonctionnent donc par paire, ce qui assure la redondance.
- Même en position basse, la travée reste partiellement suspendue sur les câbles. Cela permet de limiter les variations de charge dans les câbles et donc de limiter les effets de fatigue.
- La liaison câble/travée a été réalisée à l'aide de rotules élastomères frettées pour permettre des rotations relatives des câbles sans « à-coup ».



Figures 9 : Principes du système de levage

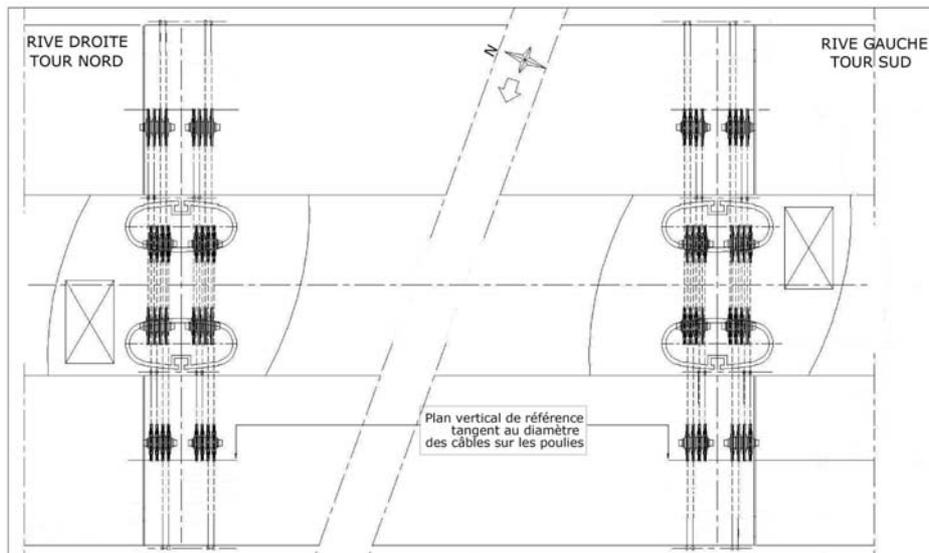


Figure 10 : Vue en plan des poulies – répartition des câbles



3.5. Les effets du vent

Compte-tenu de la conception retenue, la structure est naturellement sensible au vent. Les effets du vent ont donc été étudiés en détail (réalisation d'essais de section, de mesures in situ puis d'essais avec un modèle aérodynamique).

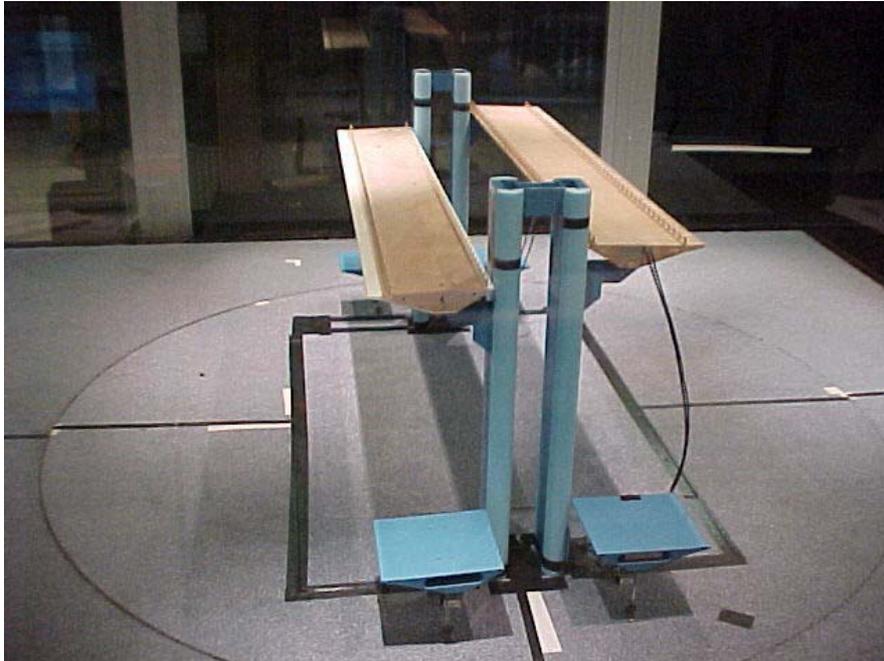


Photo 1 : Essais en soufflerie

A la suite de ces essais, la conception de la section des deux travées levantes a été modifiée (profil « en aile d'avion inversée » pour un meilleur écoulement de l'air et un effet de plaquage des travées sur leurs appuis) et des amortisseurs dynamiques accordés ont été prévus à l'intérieur des travées.

4. LA CONSTRUCTION DE L'OUVRAGE

L'opération complète nécessite la construction du pont levant, des viaducs d'accès et des raccordements routiers de ces ouvrages à la voie rapide SUD III et à l'Autoroute A150.

Les viaducs d'accès sont des ouvrages mixtes fixes de 2 x 410 mètres en rive droite et 2 x 170 mètres en rive gauche construits par lançage ou pose à la grue selon les travées.

La construction du pont levant a été confiée au groupement Quille-Eiffage-Eiffel-Victor Buyck et la construction des viaducs d'accès à l'entreprise Baudin-Chateauneuf.

4.1. La construction des appuis en Seine (socles)

Des contraintes importantes...

Les appuis de l'ouvrage levant (socles) posaient des difficultés de réalisation tout à fait inhabituelles pour plusieurs raisons :

- dimensions importantes (ellipses de 35m x 20 m pour 15 m de haut)
- interdiction d'utiliser les palplanches d'un éventuel batardeau comme coffrage latéral perdu (choix architectural et sécurité vis-à-vis des chocs de bateau pendant les travaux)
- contraintes de navigation fluviale importantes (impossibilité de fermer à la navigation plus de 12 heures de suite)

4.2. Une méthode de réalisation particulière

Le choix des entreprises s'est donc porté sur une méthode de construction peu courante (dont le principe avait déjà été utilisé pour le pont de Normandie) :

- réalisation des pieux à partir d'une estacade (photo 4)
- préfabrication du fond de radier par éléments
- pose de ces éléments sur les gaines métalliques des pieux rehaussées pour être au-dessus du niveau de l'eau (photos 4 et 5)
- bétonnage du fond de radier pour solidariser les éléments

- réalisation des parois latérales du socle à l'aide de coffrage glissant (i.e bétonnage en continu)
- (photo 2)
- butonnage des parois latérales du socle pour reprendre la poussée de l'eau
- descente du socle à sa cote finale à l'aide d'un système de vérins (photo 3)
- solidarisation du socle avec les pieux
- béton de propreté et nettoyage du fond du socle
- bétonnage du radier pleine hauteur (4 m)
- réalisation du plancher intermédiaire du socle
- fermeture du socle



Photo 2 : Coffrage glissant d'un socle



Photo 3 : Socle après descente par vérinage (à gauche) et gabion en attente de descente

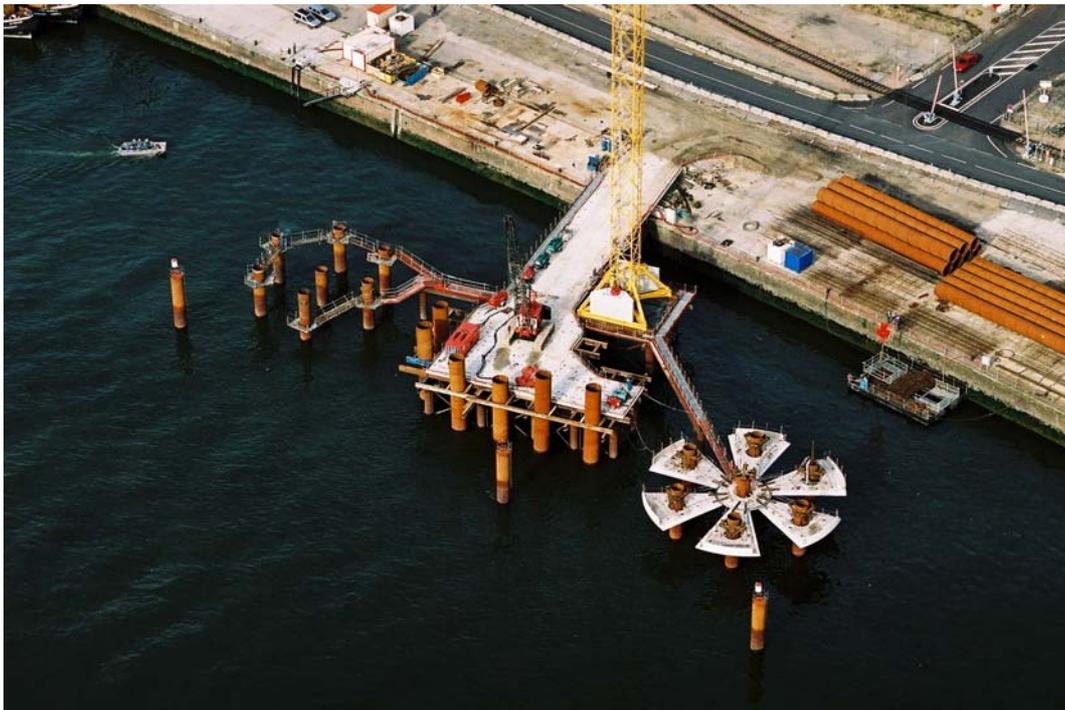


Photo 4 : Réalisation du fond de radier d'un gabion à l'aide de sections préfabriquées

4.3. La construction des gabions de protection

La construction des gabions a été réalisée de manière analogue aux socles. Néanmoins, contrairement aux socles, en phase définitive, les gabions reposent sur le fond de Seine, pas sur des pieux.

Il a donc fallu battre des gaines métalliques uniquement pour la phase construction au niveau de la Seine/ vérinage et les dimensionner en conséquence.



Photo 5 : Pose d'un élément préfabriqué de radier de gabion



Photo 6 : Installation du système de vérinage pour descente d'un gabion (avant réalisation des voiles latéraux)



Photo 7 : Gabion terminé reposant sur des gaines métalliques provisoires avant descente en fond de Seine

4.4. La construction des pylônes

Les pylônes sont constitués de 4 cylindres elliptiques de béton de 66 mètres de haut. Pour réduire les volumes verticaux, leur section elliptique est très réduite (4,35m x 9,50m pour des voiles de 35cm seulement) et a été conçue pour accueillir au plus juste :

- la cage d'ascenseur
- les contrepoids
- des passerelles de circulation latérale ainsi qu'une échelle à crinoline

Ils ont été réalisés sur place par levée de 4 mètres à l'aide de coffrages métalliques grimpants sans tiges traversantes (le coffrage est constitué de deux demi-coques qui sont serrées entre elles et donc comprimées sur l'élément de pylône précédent, ce qui permet de s'affranchir de tiges traversantes),.

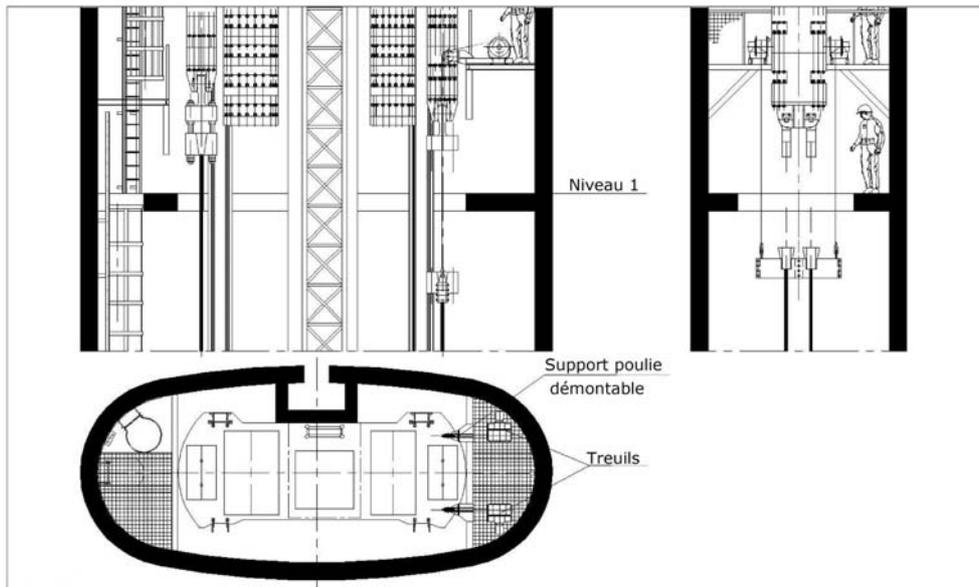
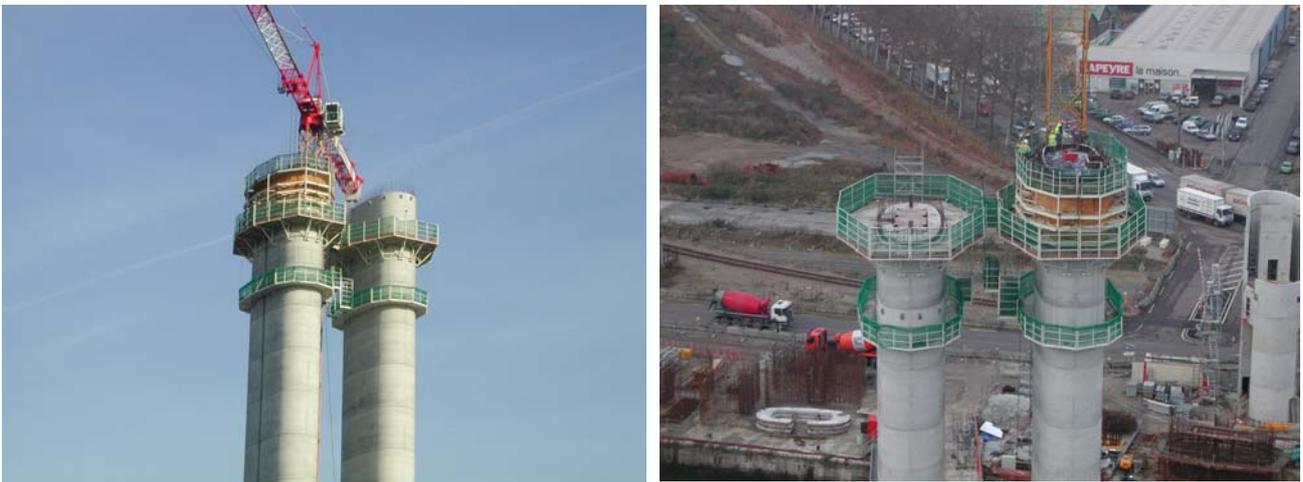


Figure 11 : Encombrement des ascenseurs et contre poids



Photos 8 et 9 : Réalisation des pylônes par coffrages grimpants

Des joints de coffrage... finalement bien marqués

Le projet prévoyait de réaliser les pylônes « sans joint apparent » entre les levées.

La méthode de l'entreprise imposait des joints tous les 4 mètres.

Un élément témoin de 8 mètres a donc été réalisé afin de tester plusieurs solutions pour la reprise du joint. Devant la grande difficulté pour obtenir des joints non-marqués homogènes vu la géométrie elliptique, il a été décidé en concertation avec l'architecte d'opter plutôt pour des joints marqués nets.

Ce choix a permis de maîtriser l'effet attendu et surtout de garantir l'homogénéité de tous les joints à réaliser.

4.5. Les travées levantes et les papillons : fabrication, transport et pose

Fabrication en usine

Les travées (1300 tonnes chacune) et les « papillons » ont été complètement préfabriqués en usine (en Belgique et en Alsace), chaque entreprise du groupement (Eiffel et Victor Buyck SC) réalisant un papillon et une travée.

Les papillons (450 tonnes chacun) sont les structures en tête des 4 pylônes béton qui solidarissent les 2 pylônes d'un même socle et supportent le système de poulies et le passage des câbles.

Ce sont des structures tubulaires (composés de tubes de 1 mètre de diamètre et de 18mm d'épaisseur), avec une géométrie assurant principalement des efforts normaux dans les tubes.



Cela a permis :

- d'obtenir une grande précision géométrique
- d'éviter des activités à grande hauteur pour les papillons



Photos 10 et 11 : Fabrication des travées

Installation des blocs poulies

Les poulies et leurs axes ont dû être posés après relevage des papillons à Rotterdam (une fois les divers ouvrages à gabarit fluvial passés).



Photo 12 : Relevage d'un papillon à Rotterdam



Photo 13 : Papillon avec poulies

Une belle traversée...

Réalisés entièrement en usine, les papillons et les tabliers ont été transportés sur des barges par voie d'eau depuis les deux usines (Alsace et Belgique) jusqu'en mer, puis ont longé les côtes françaises jusqu'au Havre avant de remonter la Seine jusqu'à Rouen.



Photo 14 : Remontée de la Seine d'un tablier

La pose : une opération spectaculaire

La pose de ces 4 éléments (2 tabliers et 2 papillons) s'est ensuite faite sur place en quelques jours à l'aide de grues flottantes de très forte capacité (bigues), ce qui a constitué un événement spectaculaire et unique et a attiré beaucoup de visiteurs.

Ces opérations de pose étaient très délicates, et une attention particulière a été apportée aux conditions extérieures (vent, marée, niveau d'eau, force et sens du courant).

Pour les papillons, la bigue (Tacklift 7) a dû être utilisée en s'approchant de sa limite de capacité (450 tonnes à plus de 70 mètres de hauteur).



Photo 15 : Pose du 2^{ème} papillon

Pour les travées, la difficulté principale a résidé dans l'encombrement dû aux socles et pylônes (pour la première travée) et dans la nécessaire coordination des deux bigues.



Photo 16 : Pose 1^{ère} travée



Ces différentes opérations ont donc nécessité une importante préparation.
La pose des quatre éléments s'est ensuite parfaitement déroulée.



Photo 17 : Vue générale après pose de la 1^{ère} travée



Photo 18 : Pose de la 2^{ème} travée

5. LA FIN DES TRAVAUX

Les câbles de levage ont été installés début 2007 après la mise en place des papillons et des tabliers en août 2006. Ce sont au total 5000 m de fils d'acier qui solidarissent les tabliers, contrepoids et treuils en s'enroulant en haut des pylônes sur 64 poulies de 3 m de diamètre chacune.

Dans chaque socle, quatre treuils ont été installés ; deux en amont pour la prise en charge du tablier aval et deux en aval pour celle du tablier amont. Les treuils ont été fixés au plafond et non posés sur la dalle de béton inférieure comme

prévu au projet initial afin que le pylône travaille en compression, ce qui permet ainsi une meilleure répartition des charges dans l'ouvrage.

Ce sont quatre moteurs qui actionnent simultanément un même treuil dont la couronne mesurant 3 mètres est entraînée par 4 motoréducteurs. Lors de chacun des levages, le tablier s'élève de 4 mètres par minute et il faudra ainsi douze minutes pour lever le tablier à 55 mètres de hauteur. Afin de pallier aux différentes pannes possibles, il est prévu une centaine de fonctions débrayables au niveau des commandes générales.

Des amortisseurs dynamiques accordés de 15 tonnes chacun ont ensuite été installés :

- Un est situé à mi-travée afin d'améliorer le confort des usagers
- Deux autres sont disposés à chaque extrémité du tablier afin d'amortir les vibrations potentielles au freinage lorsque le tablier vient reposer sur ses appuis.

Pour son exploitation, l'ouvrage reçoit les principaux équipements suivants :

- Un ascenseur dans chaque pylône
- Les dispositifs de ventilation propres à assurer une atmosphère sèche dans les pylônes et les socles, et à refroidir les motorisations
- Des dispositifs vidéo pour contrôler les treuils pendant les manœuvres
- Des protections incendie, anti-intrusion, foudre



Photo 19 : Installation des câbles de levage



6. CONCLUSION

Les premiers essais de levage ont eu lieu au cours du premier semestre 2007. Le 14 avril, les tabliers se sont élevés à 35 m pour laisser passer le trois-mâts le Belem, dernier des grands voiliers de commerce français du XIXème siècle, encore en navigation.

Le 5 juillet 2008, les plus beaux voiliers du monde entreront dans le port de Rouen, par la porte majestueuse que dessinent le pont Flaubert et ses tabliers levés.

Le mise en service de la liaison complète est prévue au deuxième semestre 2008.



Photo 20 : Passage du Belem sous l'ouvrage le 14 avril 2007

7. LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

- Maîtrise d'ouvrage : Etat, Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer représenté par la Direction Régionale de l'Équipement de Haute-Normandie, Service de Maîtrise d'Ouvrage
- Maîtrise d'œuvre générale : Direction Inter-départementale des Routes Nord-Ouest, (DIRNO), Service d'Ingénierie Routière de Rouen précédemment Service Études et Grands Travaux de la DDE76.
- Assistant maître d'œuvre général : CETE Normandie-Centre, SETRA
- Contrôle extérieur : LRPC Rouen, Blois, Nancy, Lille, FIT (contrôles topographiques)
- Contrôle technique (tour de contrôle) : APAVE
- Maîtrise d'œuvre particulière : Arcadis (mandataire) – Michel Virlogeux – Aymeric Zublena – Eurodim – Serf
- Coordonnateur SPS : Présents
- Entreprises :
 - Pont levant : Quille (mandataire) – Eiffage Travaux Publics – Eiffel - Victor Buyck SC
 - Viaducs d'accès : Baudin Chateauneuf