

Projet du pont de Normandie: conception générale de l'ouvrage

Autor(en): **Virlogeux, Michel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht**

Band (Jahr): **13 (1988)**

PDF erstellt am: **17.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-13096>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

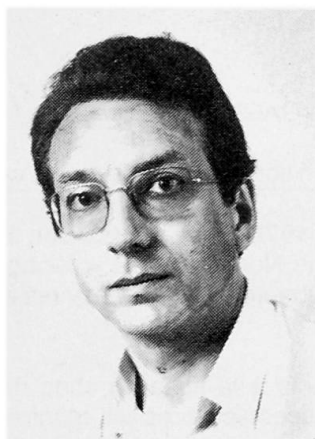
Projet du pont de Normandie – Conception générale de l'ouvrage

General Concept of the Normandy Bridge Project

Konzept und Projekt der Normandie Brücke

Michel VIRLOGEUX

Professeur ENPC
SETRA
Bagneux, France



Michel Virlogeux, born in 1946 has been graduated at Ecole Polytechnique (1967) and Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1970), and is Docteur Ingénieur (Paris University, 1973). He received the 1983 IABSE Price in Venice. He is head of the Bridges Division of SETRA, and leads the design team for the Normandy Bridge project.

RÉSUMÉ

Cet article présente le projet technique du Pont de Normandie, sur l'estuaire de la Seine, entre Le Havre et Honfleur. Avec une portée principale de 856 mètres au-dessus du fleuve, ce sera l'un des plus grands ponts à haubans du monde si sa construction commence, comme prévu, en 1988. Cet article présente l'état final du projet, tel qu'il sera soumis à l'appel d'offres, en mars 1988.

ZUSAMMENFASSUNG

Das technische Projekt der Normandie Brücke über die Flussmündung der Seine zwischen Le Havre und Honfleur wird dargestellt. Mit einer Hauptspannweite von 856 m über den Fluss wird sie, wenn die Bau-phase wie vorgesehen 1988 beginnt, eine der wichtigsten Schrägseilbrücken der Welt werden. Der Beitrag berichtet über den letzten Stand des Projekts, so wie er im März 1988 ausgeschrieben wird.

SUMMARY

This paper presents the technical project of the Normandy Bridge, over the River Seine mouth, between Le Havre and Honfleur. With a main span 856 m long over the river, it will be one of the most important cable stayed bridges in the world if the construction begins, as planned, in 1988. This paper presents the final state of the project, as it will be proposed for the invitation to bid, in March 1988.



1. GÉNÉRALITÉS

Le Pont de Normandie doit franchir l'estuaire de la Seine, légèrement à l'amont du Havre et de Honfleur. Sa construction et son exploitation ont été confiées par l'État à la Chambre de Commerce et d'Industrie du Havre, sous la forme d'une concession. Le Maître d'Oeuvre en est la Direction Départementale de l'Équipement de la Seine Maritime, qui a chargé une équipe pilotée par le SETRA de l'établissement du projet technique de l'ouvrage principal.

Cette équipe est constituée autour du SETRA par la SOFRESID, plus particulièrement chargée de la mise au point de la grande travée, par la SOGELERG, chargée de l'étude des travées d'accès en béton précontraint, et par l'ONERA à qui ont naturellement été confiées les études en soufflerie et de stabilité aéroélastique. L'architecte du projet est le cabinet Charles Lavigne.

2. CONCEPTION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE

2.1. Implantation des pylônes – Protection contre les chocs de navires

Un premier projet avait été établi entre 1976 et 1979, avec une travée principale de 510 mètres pour franchir le chenal de navigation. Outre le pylône Nord placé au voisinage de ce chenal, ce projet comportait quatre appuis en rivière, accessibles à marée haute à tous les navires de fort tonnage susceptibles de naviguer sur la Seine.

Mais les effondrements de grands ponts à la suite du choc d'un bateau se sont multipliés ces dernières années [1]. Certains de ces accidents spectaculaires ont montré qu'à la suite de conditions particulières des navires pouvaient s'écarter largement du chenal de navigation si aucun obstacle physique ne les en empêchait.

Il a donc été décidé de franchir la Seine sans appui en rivière, de la rive gauche à la Digue Basse Nord qui sépare le fleuve proprement dit des marais qui le bordent au Nord. La portée principale de l'ouvrage est ainsi de près de 900 mètres.

Le pylône Sud a été placé à terre, en rive gauche, à environ 25 mètres en arrière du quai, de façon à ce qu'un navire qui viendrait vers la rive avec un angle d'incidence important et une grande vitesse soit pratiquement arrêté par sa pénétration dans le sol avant de toucher les fondations du pylône.

De son côté, le pylône Nord est placé en avant de la Digue Basse Nord, pour ne pas augmenter la portée de façon excessive. Mais des bateaux de 130 000 tonnes et de douze mètres de tirant d'eau, arrivant avec une vitesse et un angle d'incidence déduits de simulations d'incidents établies par la SOGREAH, pourraient venir frapper violemment ses fondations. Jean Armand Calgaro a donc imaginé de constituer une enceinte de protection autour de ces fondations, formée par une longrine en béton armé de grandes dimensions (4 mètres de largeur sur 5 de hauteur) fondée sur une série de pieux rapprochés de gros diamètre (pieux de 2,60 mètre de diamètre espacés de 9 mètres), dessinant un demi cercle autour de la fondation de chaque fût (figure 2).

2.2. Principe du schéma statique longitudinal

La portée de la grande travée est ainsi de 856 mètres, ce qui constitue un bond en avant considérable par rapport au record du monde actuel, détenu par le pont d'Anacis au Canada, avec 465 mètres.

L'ouvrage a une longueur totale de 2 260 mètres. Il est constitué, de chaque côté de la Seine, par une série de travées d'accès à la travée principale. Ces travées d'accès sont construites en béton précontraint. Seule la travée principale doit être construite en acier (figure 1).

Les portées de ces travées d'accès en béton précontraint sont assez modestes : elles ne dépassent pas 58 mètres. De ce fait, les parties du tablier qui équilibrent le poids de la grande travée, par l'intermédiaire du haubanage, sont beaucoup plus lourdes que la grande travée et portées par des pilettes rapprochées. Cette solution présente de nombreux avantages :

- le montage des travées d'accès en béton précontraint est classique et facile ; la grande travée peut être

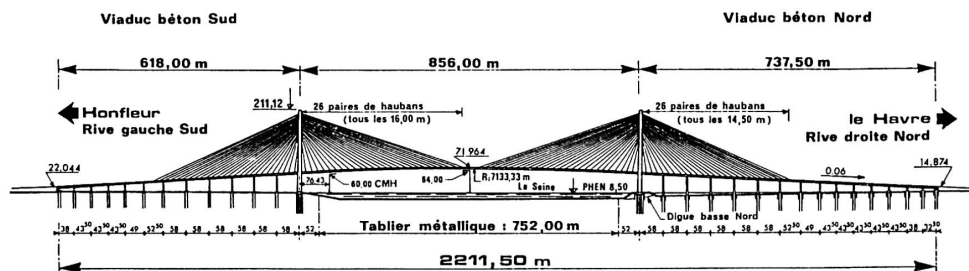


Figure 1 : Elévation longitudinale du Pont de Normandie.

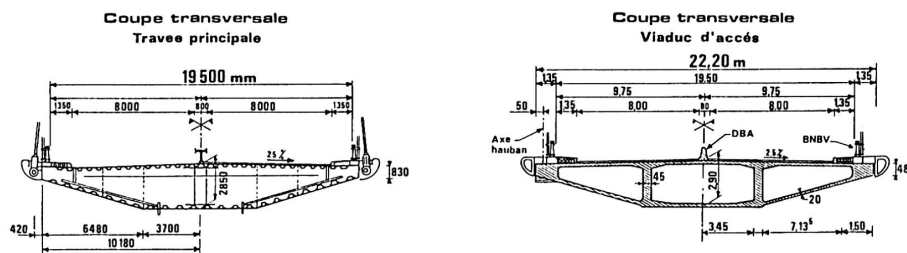


Figure 3 : Coupes transversales courantes du projet du Pont de Normandie.



- construite par encorbellements successifs à partir des pylônes ;
- cette solution permet de dessiner un haubanage aussi symétrique qu'on le souhaite par rapport aux pylônes, ce qui nous paraît plus élégant ;
 - la présence de nombreuses piles dans les accès en béton assure une multiplication du nombre des haubans "de retenue", qui sont répartis dans toute la nappe ; ce qui permet de répartir les ancrages sur une grande hauteur dans le mât ;
 - la différence de poids entre les "accès" en béton et la grande travée métallique élimine tout risque de soulèvement d'appui ;
 - la multiplication et la répartition des haubans "de retenue" rigidifie la suspension ; ce qui diminue les déplacements du tablier et surtout du pylône lors du chargement de la grande travée ;
 - lorsqu'on charge les travées d'accès, la travée principale ne subit pratiquement aucun effort ; la plage totale de variation des moments fléchissants dans la grande travée en est donc considérablement réduite ;
 - de même, les variations de tension dans les haubans de retenue sont fortement réduites, ce qui diminue les risques de fatigue ;
 - et, bien entendu, les variations de moment dans les travées d'accès sont considérablement plus faibles qu'avec un schéma classique à trois travées, ou même à plusieurs travées d'accès de moyenne portée.

Compte tenu de ce choix, il a été possible de dessiner un pylône en béton en forme de Y renversé, dont la hauteur dépasse 200 mètres et dont la crête permet de répartir les ancrages des haubans sur une hauteur d'environ 50 mètres.

2.3. Section transversale

Le principe d'un haubanage latéral a été retenu compte tenu de l'importance de la portée principale, pour améliorer la stabilité aéroélastique de l'ouvrage dans les phénomènes faisant intervenir la torsion.

La section transversale de la grande travée a été profilée en s'inspirant des ponts suspendus anglais projetés par le bureau Freeman-Fox and Partners. La hauteur du caisson métallique à dalle orthotrope a été choisie aussi faible que possible – 2,90 mètre à l'axe – et la largeur du bas de caisson a été réduite autant qu'il était raisonnable, sur les conseils d'Edmond Szechenyi, pour améliorer le profilage et augmenter le rapport largeur sur hauteur, déterminant dans les phénomènes d'écoulements tourbillonnaires. Mais aussi pour réduire la traînée, et donc les déplacements transversaux sous l'effet du vent (figure 3).

Cette section profilée a été conservée dans les travées d'accès en béton précontraint, pour assurer l'homogénéité technique et architecturale du projet.

2.4. Viaducs d'accès – Espacement des haubans

Il est envisagé de construire les viaducs d'accès en béton précontraint au moyen de voussoirs préfabriqués, et de les poser à l'avancement depuis les culées à l'aide d'un haubanage provisoire, travée par travée. La grande largeur du tablier a conduit à ne conjuguer les voussoirs qu'au niveau du caisson central, et à couler en place des joints armés dans les alvéoles latérales. Les bossages d'ancrage des haubans seraient aussi coulés en place pour faciliter la diffusion des efforts (figure 4).

Dans la grande travée métallique, les entretoises sont espacées de 4 mètres. De façon à limiter la puissance et la taille des haubans, leur entraxe a été fixé à 16 mètres dans la grande travée. Cet entraxe a été réduit à 14,50 mètre dans les travées d'accès en béton, parce que la pente importante des rampes aurait produit un effet désagréable : les haubans auraient été plus longs que dans la travée principale si l'on avait maintenu l'entraxe de 16 mètres, et les nappes de retenue auraient paru plus importantes que les nappes de suspension de la travée centrale.

La portée des travées d'accès a été choisie en fonction de l'entraxe des haubans. La valeur de 58 mètres, soit quatre intervalles d'ancrage, a été adoptée malgré la faible hauteur du caisson et son mauvais rendement géométrique. Car les haubans viennent aider la structure en béton des travées d'accès, comme s'ils réduisaient le poids propre du caisson en béton du poids du tronçon métallique central correspondant.

Cet avantage ne pouvait pas se retrouver dans les travées proches des culées, qui ne sont pas soutenues par des haubans de retenue. Ladislav Paulik et Jean Lawnicki ont donc dû raccourcir progressivement la portée des travées, depuis la fin de la zone haubanée jusqu'aux culées, Nord et Sud, en enlevant à chaque

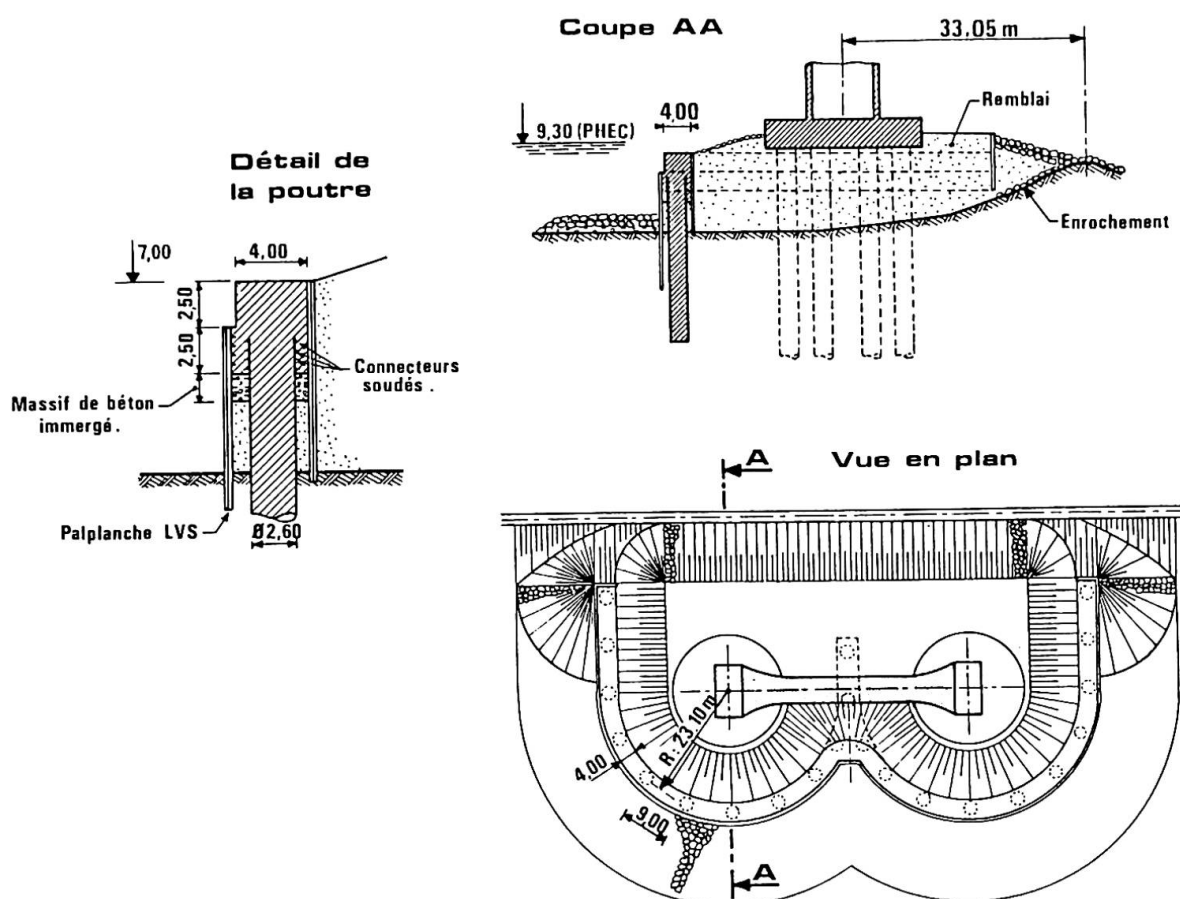


Figure 2 : Schémas de la protection du pylône Nord.

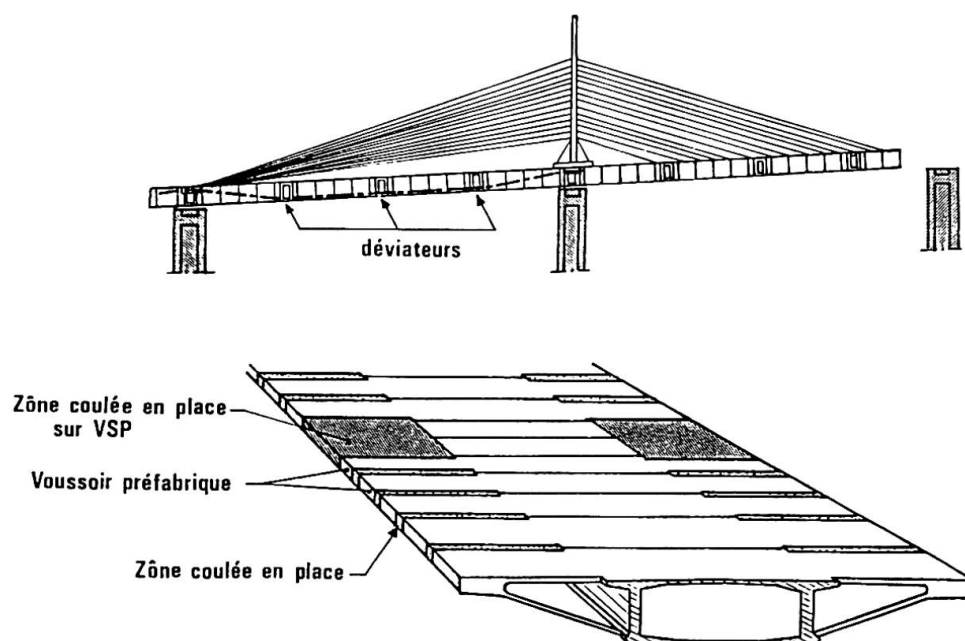


Figure 4 : Principe de la méthode de construction des travées d'accès.



fois un nombre entier de voussoirs de même longueur. Cela conduit à un schéma intéressant sur le plan esthétique puisque les travées les plus basses sont les plus courtes, ce qui assure une bonne harmonie des proportions des différents rectangles que découpent piles et tablier.

2.5. Liaison béton – acier

Pour assurer l'équilibre du tablier de part et d'autre de chaque pylône, la partie en béton a été prolongée de 52 mètres à partir de chaque pylône dans la grande travée. Cette longueur de 52 mètres a été choisie pour plusieurs raisons :

- une analyse économique comparative a montré qu'un allongement de la partie en béton était intéressant tant qu'il ne mettait pas en cause les méthodes de construction, à condition de ne pas dépasser une centaine de mètres ;
- plus la section de liaison béton – métal est éloignée du pylône, plus les efforts de flexion transversale dus au vent y sont réduits ; ce qui limite les efforts de serrage à mettre en œuvre à la liaison ;
- la méthode de construction à l'avancement à l'aide de haubans provisoires permet de construire avec le matériel de construction des travées d'accès des consoles de 58 mètres, sans la moindre modification ; la longueur de 52 mètres est la plus grande en dessous de 58 mètres qui soit compatible avec la position des ancrages des haubans ;
- l'allongement des consoles au delà d'une trentaine de mètres permettra de lever directement depuis la Seine les tronçons successifs de charpente métallique, dont la longueur devrait être de 16 mètres.

L'analyse des efforts de flexion longitudinale a conduit Vu Bui à placer les premiers haubans très près du pylône, où ils sont peu efficaces sous charges d'exploitation mais permettent de diminuer les importants efforts de flexion dus au poids propre de la partie en béton. Grâce à cette disposition et à un réglage judicieux des tensions des haubans, les moments fléchissants sont très faibles dans l'ouvrage, et la section métallique courante est partout suffisante, ne demandant aucun renfort local.

Sur le plan des détails techniques, la liaison entre la partie en béton et la partie en acier est assurée en garantissant un alignement aussi parfait que possible des fibres moyennes des différents voiles :

- en ce qui concerne les voiles latéraux inclinés et le hourdis inférieur, la tôle métallique ne vient qu'à 5 centimètres du bord du béton ; comme le centre de gravité des voiles métalliques, raidis par les augets, est à 4 ou 5 centimètres de la paroi, l'alignement est à peu près parfait avec des voiles en béton de 20 centimètres d'épaisseur ;
- il n'y a pas d'âmes verticales dans la section courante de la grande travée ; mais il y en a dans le prolongement des âmes en béton, sur une dizaine de mètres au delà de la liaison avec le béton, pour assurer un bon transfert des efforts ;
- en ce qui concerne le hourdis supérieur, les conditions de continuité de la surface de roulement ont interdit un parfait alignement des fibres moyennes, mais l'écart est fortement réduit par la puissance des augets de la dalle orthotrope.

La section de liaison entre les parties en béton et en acier est fortement sollicitée par le moment transversal dû au vent, et par le moment longitudinal dû aux charges d'exploitation, que l'effort normal produit par le haubanage ne suffit pas à équilibrer. La résistance est donc assurée par la mise en œuvre d'une précontrainte de serrage. Une partie de cette précontrainte est créée par des grands cables qui dépassent la zone du pylône où ils sont utiles. Le complément est assuré par des barres de précontrainte courtes, ancrées sur des zones fortement raidies de la charpente, dans les mêmes conditions que pour la précontrainte de liaison d'un avant-bec de poussage.

2.6. Les pylônes

Les pylônes ont été dessinés de façon à permettre l'ancrage des haubans, en principe tendus depuis le tablier, et à permettre la visite ultérieure des pylônes et des ancrages, ainsi que le réglage éventuel de la tension des haubans depuis les mâts.

Les formes intérieures ont été choisies de façon à ne transmettre que des efforts d'appui au béton. Et à livrer passage, de chaque côté du voile central, à une échelle à crinoline – tantôt à gauche, tantôt à droite – et à une cheminée de descente du vérin de réglage.

Les haubans les plus bas ont été légèrement cintrés dans leurs passages dans le béton, par Hélène Abel et Jocelyne Jacob, de façon à remonter leurs points de sortie, pour les intégrer dans les formes architecturales définies en collaboration avec Charles Lavigne.

2.7. Conditions de liaison du tablier et des appuis

Pour assurer une excellente résistance au vent, et limiter autant que possible les déplacements de balancement transversal qu'il produit, il a été décidé d'encaster dans chaque pylône le tablier, qui est en béton à ce niveau, et de placer sur les piles des travées d'accès des appareils d'appui fixes transversalement. Le vent crée donc, sur les piles voisines des pylônes, des réactions horizontales transversales qui peuvent atteindre 100 tonnes dans les conditions de service.

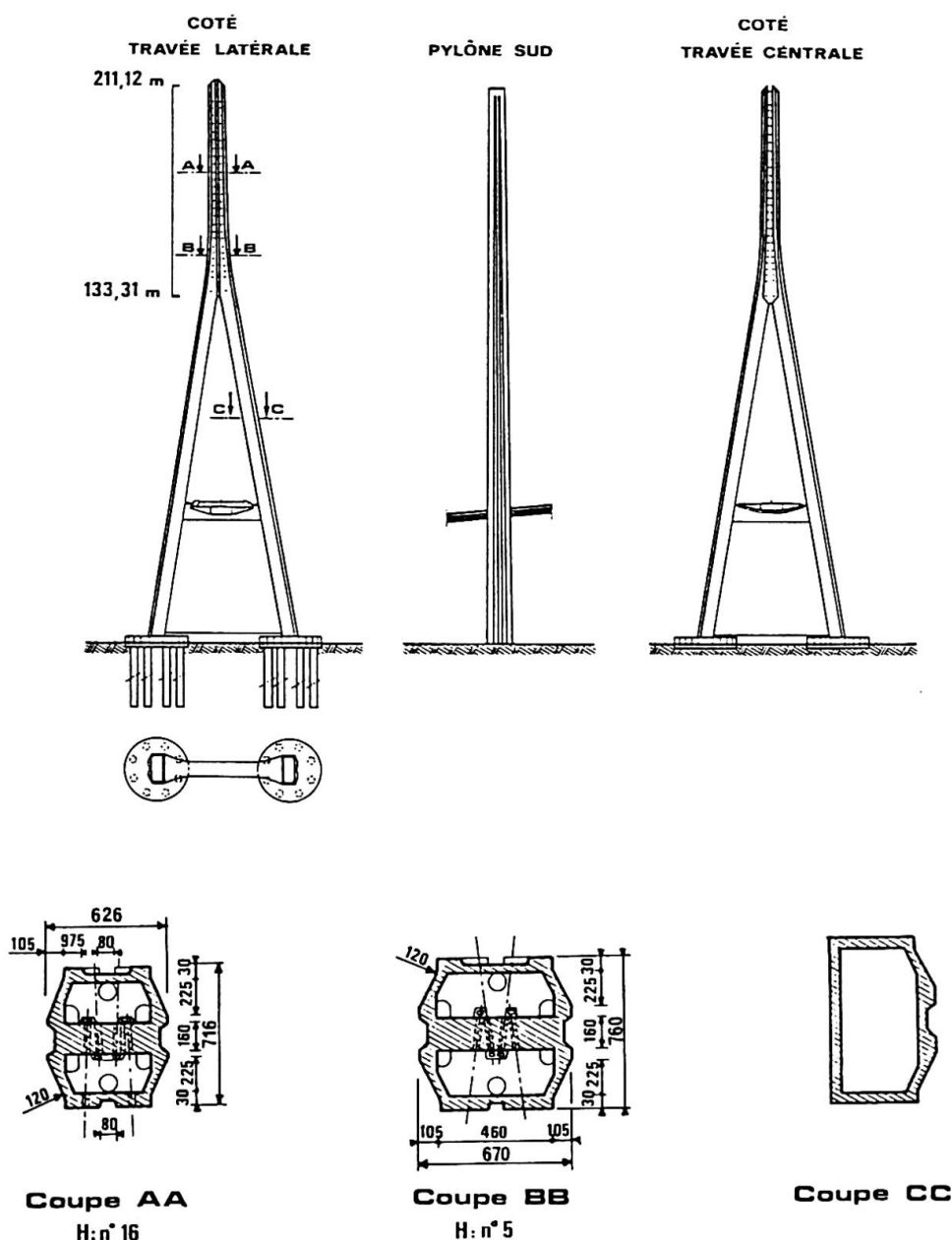


Figure 5 : Schémas de définition des pylônes.



Compte tenu du schéma statique longitudinal qui a été retenu, la travée centrale fonctionne en portique, si bien que les variations de température créent dans les pylônes des efforts de flexion non négligeables, mais acceptables.

Comme il n'est pas possible de créer des joints de dilatation dans la partie haubanée de l'ouvrage, il a été décidé de ne placer des joints qu'au droit des deux culées. Mais la rigidité des pylônes permet de limiter l'ouverture des joints à des valeurs raisonnables, de l'ordre de 70 centimètres (de + 30 à - 40 centimètres).

Enfin, comme les piles les plus proches des pylônes sont extrêmement souples du fait de leur grande hauteur, et comme les déplacements longitudinaux sont faibles au voisinage des pylônes où le tablier est encastré, il a été possible de placer des appareils d'appui fixes sur les premières piles à partir des pylônes. Sur les autres piles, les appareils d'appui sont fixes transversalement et glissants dans le sens longitudinal.

2.8. Choix du type des haubans

Le choix du type des haubans sera évidemment laissé à l'initiative de l'entreprise. Pour l'établissement du projet, Jean Claude Foucriat a choisi des câbles clos, avec des couches internes de fils ronds galvanisés de 5 millimètres de diamètre, deux couches extérieures de fils Z galvanisés, et une couche de protection en fils Z d'Almelec, un alliage d'aluminium qui assure une bonne protection contre la corrosion. Cette dernière couche ne participe pas réellement à la résistance mécanique du câble, compte tenu de la faible valeur du module de déformation de l'alliage.

Cette solution a semblé la meilleure dans la mesure où :

- le poids au mètre linéaire du câble est plus faible que pour toutes les autres solutions, pour une valeur donnée de la tension utile, ce qui limite l'effet de chaînette ; en particulier, toutes les solutions prévoyant l'injection d'une large gaine au coulis de ciment doivent être écartées ;
- le diamètre extérieur du câble est plus faible que pour toutes les autres solutions, pour une valeur donnée de la tension utile, ce qui limite les efforts dus au vent, qui ne doivent pas être négligés compte tenu de l'importance considérable de la surface au vent de la nappe de haubanage.

En contrepartie, le module de déformation longitudinale des câbles constitués de torons ou de fils parallèles (ou légèrement torsadés) est supérieur à celui des câbles clos ; mais les avantages que nous venons d'évoquer ont semblé suffisants pour compenser ce handicap.

3. CONCLUSION

Compte tenu de l'importance de l'ouvrage et de la valeur de la portée centrale, le Directeur des Routes a décidé de constituer une Mission d'Évaluation, chargée de donner un avis motivé sur le projet du Pont de Normandie. Cette mission, présidée par l'Inspecteur Général Marcel Huet, est constituée des Inspecteurs généraux Henri Mathieu et Charles Brignon et des Professeurs Roger Lacroix, Jorg Schlaich et René Walther.

Cette mission a déjà donné un avis favorable sur l'avant projet en juillet 1987, et suggéré un certain nombre d'aménagements, dont plusieurs ont été retenus par l'équipe d'étude pour l'établissement de l'avant projet détaillé, qui servira de base à l'appel d'offres qui doit être lancé en février ou mars 1988.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ship Collision Problems with Bridges and Offshore Structures. IABSE Colloquium, Copenhagen 1983. IABSE publications volumes n° 41 (Rapport Introductif), 42 (Rapport Préliminaire) et 43 (Rapport Final).
- [2] M. Virlogeux, J.C. Foucriat, B. Deroubaix : Design of the Normandie Cable Stayed Bridge, near Honfleur. Cable Stayed Bridges. Experience and Practice. Proceedings of the International Conference on Cable Stayed Bridges, Bangkok, novembre 1987 – p. 1123-1134.