

Les fondation profondes des pylônes du pont de Brotonne

Autor(en): **Brault, J.L. / Mathivat, J.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **10 (1976)**

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-10449>

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.

Les fondations profondes des pylônes du pont de Brotonne

Tiefgründung der Pylonen der Brotonnebrücke

The Deep Foundations of the Towers of the Brotonne Bridge

J.L. BRAULT
 Professeur ENPC
 Ingénieur D.D.E., Seine Maritime
 Rouen, France

J. MATHIVAT
 Professeur ENTP, Directeur des Etudes
 Entreprises Campenon Bernard
 Paris, France

Les fondations profondes des ponts de grande portée sont constituées généralement, soit de caissons, havés à l'air libre ou foncés à l'air comprimé, soit de pieux forés de diamètre égal ou supérieur à 2 m.

Si les appuis des ouvrages sont implantés en site terrestre, ou s'ils sont situés en site nautique, mais peuvent être reliés provisoirement à la rive par un remblai d'accès ou une digue, un autre type de fondation peut être envisagé. Il s'agit de colonnes cylindriques, de grandes dimensions, exécutées à l'abri d'un cuvelage autostable réalisé au moyen d'une paroi moulée.

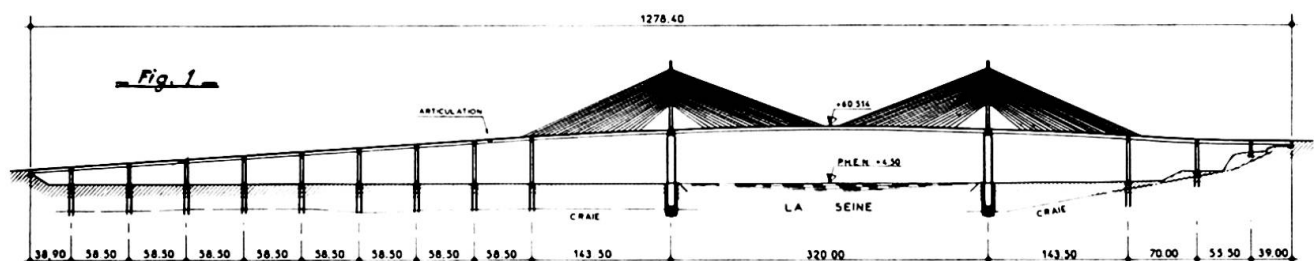
Cette solution présente plusieurs avantages :

- la fondation est massive et offre une excellente résistance vis-à-vis des chocs accidentels : corps flottants et convois fluviaux;
- sa structure est simple de conception et économique d'exécution; les bétons de fondation sont mis en oeuvre dans des conditions de fiabilité supérieures à celles des pieux;
- si le substratum est étanche, ou peut le devenir par un traitement approprié (tel des injections), elle permet une reconnaissance visuelle et une investigation géotechnique du terrain d'assise, pouvant conduire éventuellement à un ajustement du niveau de fondation.

L'objet de la présente communication est de décrire une solution de ce type qui a été retenue pour les fondations des pylônes du pont de Brotonne et d'analyser les enseignements qui peuvent être tirés de cette expérience.

1- Description des fondations du pont de Brotonne

Le pont de Brotonne, qui assurera le franchissement de la Seine entre Rouen et Tancarville, comprend dans sa partie centrale un pont à haubans en béton précontraint de 320 m. de portée qui constituera pour l'instant le record du monde des ouvrages de cette catégorie (fig. 1).



Au droit des fondations, les terrains rencontrés étaient les suivants :

de + 4 à - 13 : remblais, alluvions et limons;
de - 13 à - 23 : alluvions sablo-graveleuses;
à partir de - 23 : craie, d'abord altérée, puis de plus en plus consistante.

La cote de fondation théorique a été fixée dans la craie saine à - 31, c'est-à-dire à une profondeur de 35 m.

Les essais de laboratoire ont montré que la résistance à la compression simple de la craie saine était comprise entre 20 et 80 bars et sa résistance à la traction entre 5 et 10 bars, ce qui correspond à des caractéristiques mécaniques élevées :

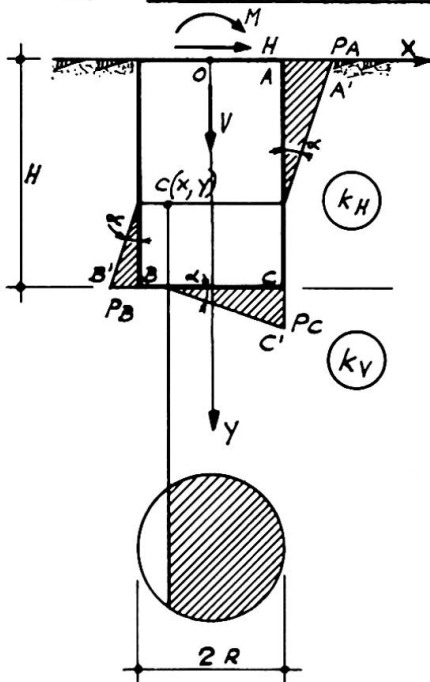
angle de frottement interne $\varphi \geq 20^\circ$
cohésion $C \geq 5$ bars

La valeur minimale de la pression limite nette déduite des essais pressiométriques était égale à 45 bars.

L'altération de la craie se manifestait en profondeur par une fissuration de la roche, dont la forte perméabilité a été mise en évidence par les essais d'eau. Cette perméabilité a pu être réduite suffisamment pour permettre l'exécution à sec de la fondation, grâce à des injections au coulis de ciment comportant un rideau d'encagement extérieur prolongeant le cuvelage en paroi moulée et un fond étanche.

3- Stabilité et portance de la fondation

3,1- Stabilité de la fondation



— Fig: 3 —

Compte tenu de ses dimensions (diamètre 12,5 m - hauteur 35 m), la colonne de fondation peut être considérée comme un massif cylindrique indéformable encastré dans le terrain. Ce massif est défini par son rayon R et sa hauteur H d'encastrement (fig. 3).

Sous l'effet des efforts appliqués, comprenant un effort vertical V, somme de la réaction exercée par la superstructure et du poids propre du massif, un effort horizontal H et un moment de renversement M agissant en tête, le massif va tourner d'un angle α autour d'un centre instantané de rotation C.

On peut admettre que l'amplitude de cette déformation est suffisamment faible pour que le sol travaille dans la phase des déformations pseudo-élastiques. Les pressions exercées sur le sol seront alors supposées normales aux surfaces de contact (ce qui revient à négliger les frottements fondation-terrain) et proportionnelles aux déformations. D'où : $p = kW$

k : module de réaction du sol
p : pression exercée sur le sol
W : déformation du sol

On distinguera deux modules de réaction : le module de réaction verticale k_V du terrain situé sous la base du massif et le module de réaction horizontale k_H du terrain entourant le massif, qui peut prendre plusieurs valeurs selon la nature des horizons traversés.

En supposant connues les coordonnées X et Y du centre instantané de rotation, on peut calculer les déplacements des points A, B et C du massif et les pressions PA, PB, PC qui s'y développent.

La résolution du problème se ramène alors à la détermination des trois inconnues α , X et Y, pour laquelle on dispose des trois équations d'équilibre du massif.

Dans le cas du pont de Brotonne, le calcul a été effectué sur ordinateur, en considérant que le sol était constitué de trois couches de caractéristiques différentes et en négligeant les terres situées entre le niveau du terrain naturel + 4 et le plafond de la Seine - 5 (mort terrain). Le niveau de la nappe phréatique a été supposé à + 4.

On a représenté sur la figure 4 les résultats obtenus pour le cas de charge créant les contraintes extrêmes maximales sous la fondation (charges permanentes effets thermo-hygro-métriques et vent transversal). La compression maximale sur la craie atteint alors 24 bars, pour une rotation du massif de $1,4 \times 10^{-3}$ radian. La compression moyenne maximale est égale à 16 bars sous surcharges d'exploitation.

Sur la partie droite de la figure a été tracé le diagramme des moments de flexion le long de la colonne. On constate que le moment de flexion à la base de la fondation est égal à une fraction relativement faible du moment des forces appliquées, environ le quart dans le cas considéré; cette valeur pouvant même devenir négligeable, si la hauteur de la colonne augmente ou si la raideur du terrain croît.

La rigidité de ce type de fondations est donc telle qu'elle limite les déplacements de l'ouvrage, vis-à-vis des efforts transversaux climatiques (vent) ou exceptionnels (chocs de bateaux dans le cas de fondations en rivière) tout en s'accommodant dans le sens longitudinal d'un encastrement élastique du tablier sur les piles.

Le calcul précédent supposant que le sol travaille dans le domaine des déformations pseudo-élastiques, il convient de vérifier, d'une part, que les pressions latérales sont inférieures aux limites pseudo-élastiques et, d'autre part, que les contraintes sur la base demeurent inférieures au tiers des contraintes de rupture.

3,2- Portance de la fondation

La contrainte de rupture q de la craie à la base de la colonne peut se déduire des caractéristiques pressionométriques :

$$q = q_0 + K (p_1 - p_0) = 70 \text{ bars}$$

avec :

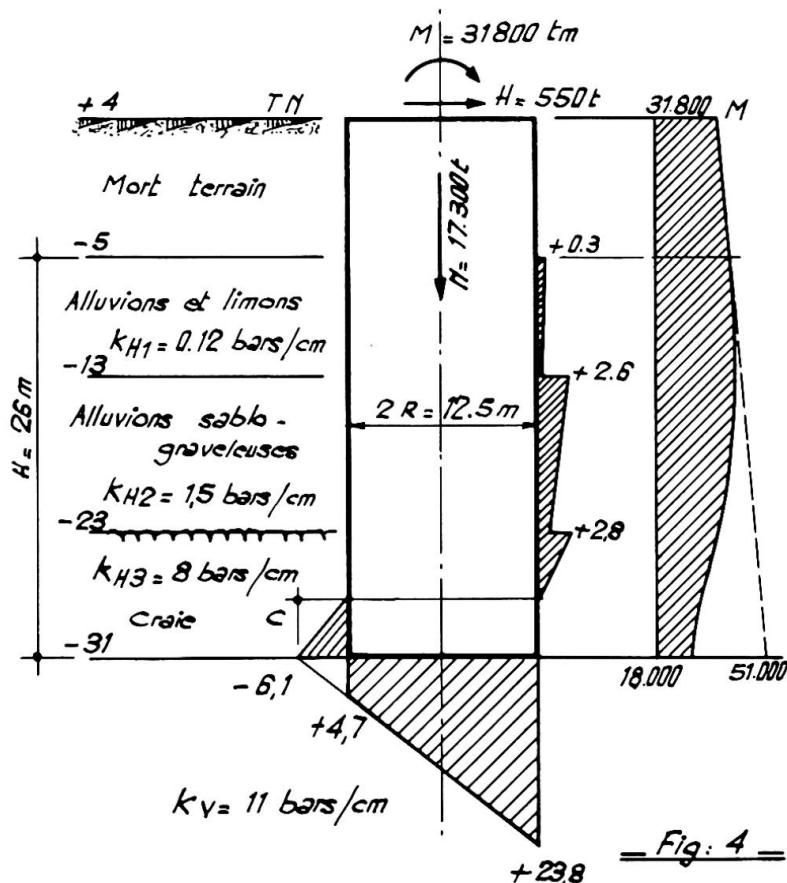
$$p_1 - p_0 = 45 \text{ bars}$$

$$q_0 = 3 \text{ bars}$$

$$K = 1,5$$

La contrainte admissible est donc égale à 24 bars.

La détermination de la force portante de la fondation à partir des essais en laboratoire ($\varphi = 20^\circ$, $C = 5 \text{ bars}$) conduit à des résultats plus favorables :

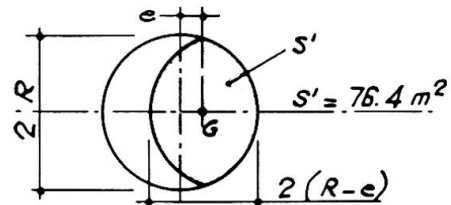


$$q = \gamma h \beta_q N_q + C \beta_c N_c = 99 \text{ bars avec :}$$

$$N_c = 14,8 \quad \beta_c = 1$$

$$N_q = 6,4 \quad \beta_q = 1,3$$

$$\gamma = 1 \quad h = 35 \text{ m}$$



La contrainte admissible est égale à 33 bars pour un taux de travail du sol de :

$$\frac{17.300}{76,4 \times 10} = 22,6 \text{ bars}$$

Bien que la méthode pressiométrique soit plus sûre que les essais en laboratoire - ceux-ci ne portant que sur des échantillons intacts prélevés par conséquent dans les zones les plus saines de la craie, alors que le pressiomètre mesure plutôt les horizons les plus déformables de la roche - nous pensons que les fondations sur colonne profonde, encastrée dans le terrain, peuvent profiter pleinement du pouvoir porteur élevé du substratum. En effet, le moment de flexion transmis à la base de la fondation est réduit dans de fortes proportions par les réactions latérales du terrain, alors que l'effort normal est diminué également par les frottements fondation-terrain, qui ont été négligés dans les calculs précédents. Des contraintes moyennes plus élevées pourraient probablement être admissibles, si on pouvait réduire les dimensions de la fondation sans augmenter trop les déformations qui en résulteraient au niveau du tablier.

4- Problèmes d'exécution - Incidents

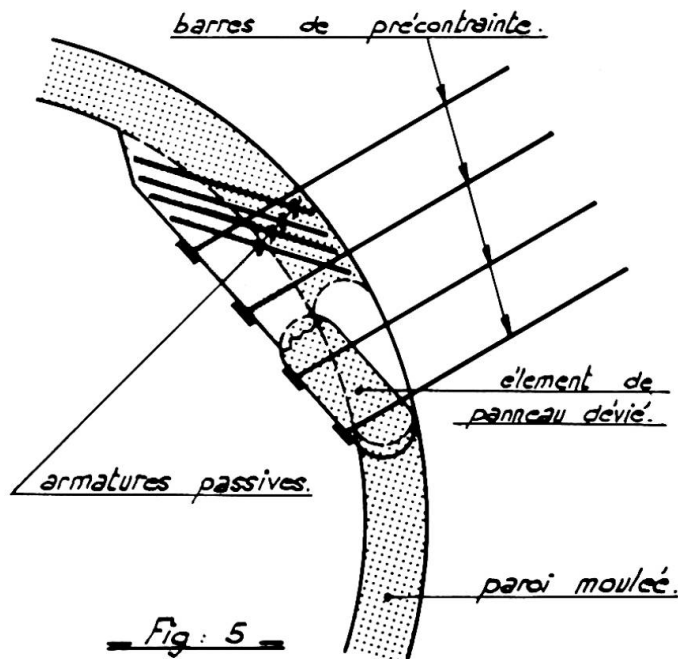
4,1- Exécution du cuvelage

Le cuvelage, de forme circulaire, travaille en anneau. En limitant, pour des raisons de stabilité élastique, la contrainte de compression du béton à 40 bars, une paroi moulée de 0,50 m. d'épaisseur suffirait. Pour se prémunir contre les imprécisions du forage, pouvant entraîner une ovalisation de la paroi, et le risque d'efforts de flexion parasites provenant d'une répartition inégale des pressions du terrain, il ne semble pas souhaitable de descendre en dessous de 0,60 m. Au pont de Brotonne, on a préféré exécuter une paroi non armée de 0,80 m. d'épaisseur plutôt qu'une paroi armée de 0,60 m. d'épaisseur.

Certains panneaux des parois moulées ont cependant subi des déviations qui conduisaient à un funiculaire de compression poussant au vide. Ces déviations dues, soit à un incident de bétonnage lors de la réalisation des joints entre panneaux, soit à la rencontre d'un point dur sous la benne de forage, ont nécessité des travaux confortatifs.

Ces travaux ont revêtu deux aspects :

Pour le pylône Rive Gauche, où deux panneaux seulement avaient dévié sur les 7 derniers mètres de la paroi - c'est-à-dire au niveau de la craie - un renforcement partiel a été effectué au droit des panneaux concernés. La continuité du cuvelage a été rétablie par bétonnage d'un élément intérieur lié à la paroi moulée par des armatures passives scellées dans cette dernière. La stabilité de forme du cuvelage était



assurée par des barres de précontrainte ancrées dans la craie et reprenant la poussée au vide (fig. 5).

Pour le pylône Rive Droite, par contre, il s'est révélé nécessaire de procéder à un renforcement général au moyen de cerces concentriques à la paroi. Les premières déviations se sont en effet produites au niveau des couches superficielles dans lesquelles il était aléatoire de s'ancrer. Un blindage intérieur continu a donc été réalisé jusqu'à l'intérieur de la craie franche par l'intermédiaire de cerces de 2 m. de hauteur, bétonnées au fur et à mesure de l'avancement du terrassement.

Le cuvelage a été exécuté par la Société Solétanche.

4,2- Terrassements et superstructures

Le terrassement des colonnes s'est déroulé dans des conditions satisfaisantes au moyen d'un chargeur descendu au fond de la fouille, l'extraction de la craie ayant toutefois nécessité l'emploi d'un dérocteur.

Pendant l'exécution des terrassements, les fouilles ont pu être maintenues à sec par pompage, les débits d'eau en fin de travaux variant d'une colonne à l'autre de 50 m³/h à 105 m³/h. Afin d'éviter le risque de désagrégation de la craie à la base de la paroi moulée par suite des venues d'eau, le bouchon de béton inférieur de chaque colonne a été exécuté sous l'eau au tube plongeur, après contrôle du fond de fouille.

La superstructure des colonnes a ensuite été bétonnée à sec, à l'intérieur de coffrages glissants.

5- Conclusions

La solution décrite permet de fonder économiquement des charges importantes (de l'ordre de 20.000 t. dans le cas du Pont de Brotonne) à de grandes profondeurs. De caractère massif, elle est plus résistante aux efforts horizontaux qu'une fondation sur pieux, et d'exécution plus sûre qu'une fondation sur caissons havés, dont la descente au niveau souhaité, est souvent difficile. Elle constitue donc une solution intéressante pour les fondations des ponts de grande portée.

RESUME

Les pylônes du pont de Brotonne, ouvrage haubanné de 320 m de portée centrale, sont fondés sur des colonnes cylindriques de 35 m de profondeur exécutées à l'abri d'un cuvelage autostable en paroi moulée servant de batardeau. La description de ce type de fondation, l'étude de sa stabilité et de sa portance, ainsi que l'analyse des conditions d'exécution sont traitées par les auteurs.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Pylonen der Brotonnebrücke, einer Schrägseilbrücke mit einer Mittenstützweite von 320 m, sind auf 35 m hohen zylindrischen Säulen im Innern einer selbsttragenden aus Schlitzwänden erstellten, als Fangdamm dienenden Rüstung fundiert. Der Artikel dieses Gründungssystems behandelt vor allem seine Tragfähigkeit sowie die Ausführungsbedingungen.

SUMMARY

The towers of the Brotonne Bridge, a cable-stayed bridge with a 320 m center span, are founded on 35 m cylindrical columns; these are constructed within a self-supporting slurry trench wall acting as cofferdam. In this article the authors have mainly dealt with this type of foundation, its bearing capacity and the construction conditions.