

Influence des dénivellations d'appuis d'un pont mixte

Clément DESODT - Hélène HORSIN MOLINARO
Hadrien RATTEZ

Edité le 14/05/2018

Cette ressource est issue du dossier d'ingénierie d'agrégation Génie Civil d'Hadrien Rattez. Cette étude de cas s'appuie sur le cas concret du pont Jeanne d'Arc de Rouen ; les détails sur cet ouvrage d'art et sa restauration, sont à consulter dans la ressource « Etude du renforcement d'un pont mixte ».

Lorsque les appuis d'un ouvrage se tassent de façon uniforme, l'ossature n'est pas affectée et cela ne crée pas de contrainte dans la structure ; néanmoins au-delà d'une certaine valeur de tassement, les réseaux circulant sur le pont (conduite d'eau, câblage...) peuvent être affectés ainsi que le confort de la route (marche). Mais dans le cas d'un ouvrage hyperstatique (comme c'est le cas du pont Jeanne d'Arc de Rouen), les tassements peuvent provoquer des désordres structuraux, voire même la ruine complète de l'ouvrage.

Dans cette ressource, les contraintes que les tassements peuvent générer sont estimées ; les aspects géotechniques ont été exclus de la vérification de l'ouvrage car aucune observation de désordre qui aurait pu être causé par des tassements différentiels n'a été faite.

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

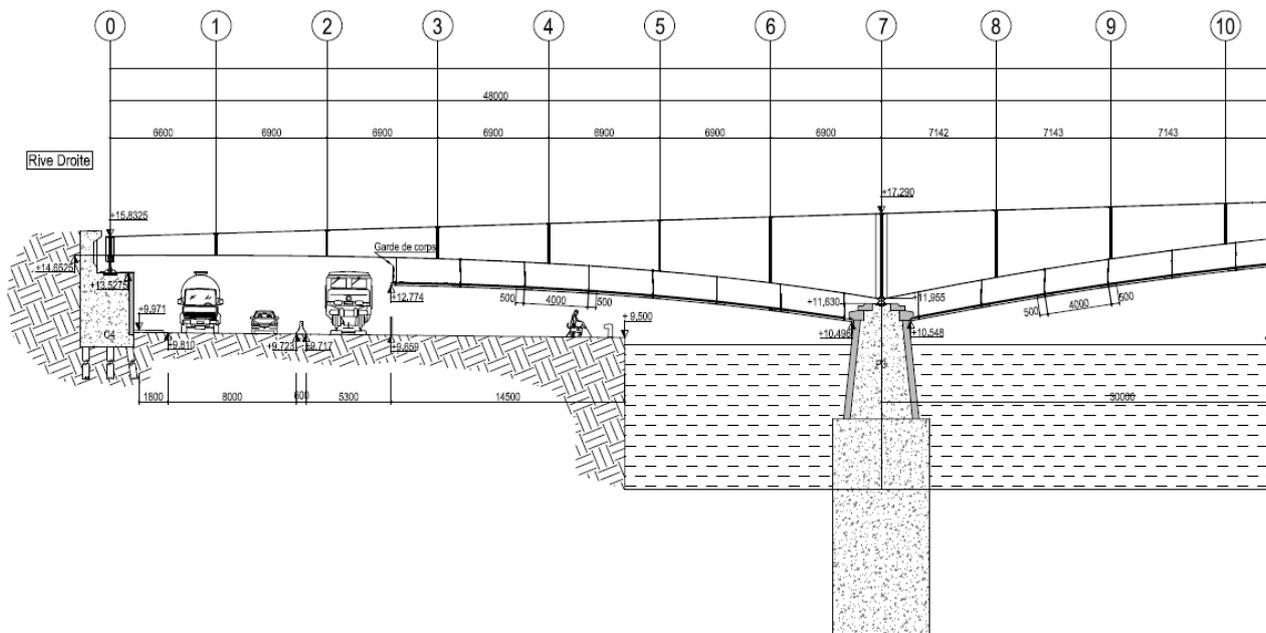


Figure 1 : Coupe longitudinale partielle du pont

La conception de l'ouvrage est telle que les valeurs de réactions d'appuis au niveau des culées sous le seul effet du poids propre, sont quasiment nulles. Les bielles* sont là pour reprendre la dilatation thermique et le soulèvement dû aux charges d'exploitation. En effet, en calculant les charges dues seulement au poids propre aux ELU* et en considérant le hourdis* comme non collaborant*, on obtient les réactions suivantes au niveau des piles* et culées* (en kN) :

Culée rive gauche	Piles rive gauche	Piles rive droite	Culée rive droite
788	37256	37356	636

On peut donc considérer qu'il n'y a pas eu de tassement depuis la phase de construction au niveau des culées et calculer l'effet du tassement des deux piles sur l'ouvrage.

1 – Calcul du tassement des piles

Les piles sont des appuis en béton non armé fondées jusqu'à la craie marneuse bleues. La section de ces appuis est rectangulaire de 6,0 m x 28,8 m avec des extrémités en forme d'ogive. Ces appuis sont surmontés par des fûts* en béton armé habillé de pierres de taille. Ils ont quant à eux une forme tronconique en élévation avec un fruit* de 10%.

Pour déterminer le tassement de ces piles, on doit d'abord déterminer de quel type de fondation il s'agit. On utilise la classification du fascicule 62 titre V¹. La hauteur d'encastrement D est de 5,9 m et la largeur B de la semelle est de 6 m, donc il s'agit d'une fondation superficielle.

On détermine ensuite les caractéristiques des sols dans lesquels la pile repose :

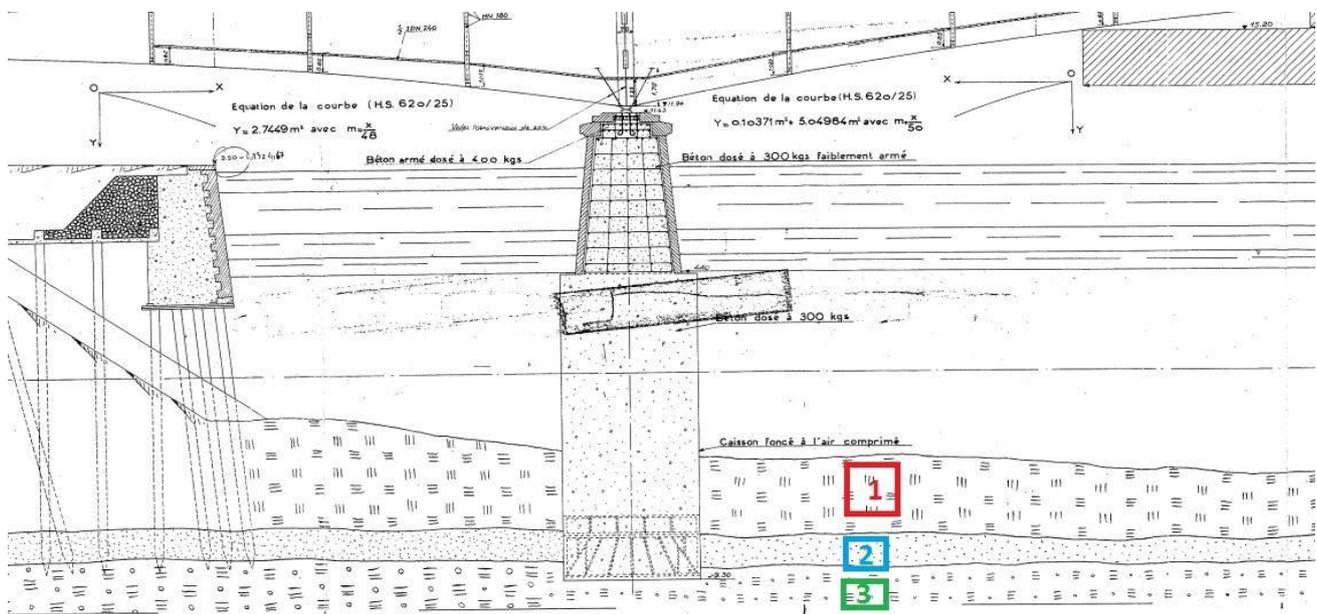


Figure 2 : Coupe longitudinale du pont dans les plans d'origine avec 1 sable calcaire, 2 sables siliceux et 3 marne calcaire bleue

Pour chacun de ces sols, des caractéristiques moyennes sont choisies :

Sol	γ_h (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	E_m (Mpa)	E_s (Mpa)
Sable calcaire	18	21	11	10	20
Sable siliceux	19	21	11	10	20
Marne calcaire	19	21	11	50	80

Figure 3 : Caractéristiques des sols supportant les piles du pont

¹ Règles en cours au moment de cette étude.

Les tassements sont calculés selon la méthode élastique et la méthode pressiométrique en considérant que la semelle* est parfaitement rigide [1].

1.1 - Méthode élastique

Le tassement en un point quelconque d'une semelle ancrée reposant à la surface d'un milieu élastique homogène semi-infini est donné par la formule :

$$s = f \cdot \frac{1-\nu^2}{E'} \cdot B \cdot (q' - \sigma'_{v0})$$

s : tassement au point considéré

B : largeur de la semelle

q' : contrainte effective moyenne appliquée au sol par la semelle

f : coefficient de forme

E' : module d'élasticité drainé (80 MPa dans ce cas)

ν : coefficient de Poisson (0,3 en général pour les sols)

σ'_{v0} : contrainte effective initiale régnant au niveau de la semelle, loi de Terzaghi² $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u$ avec u , pression interstitielle (voir ressource « *Les glissements de terrain, modélisation et prévision* » paragraphe 3)

Comme L/B vaut 4,8 pour cette semelle, d'après les valeurs données dans un tableau pour une semelle rectangulaire $f = 1,65$.

La contrainte effective moyenne est la somme de trois termes : la charge du poids propre du tablier, le poids du fût et le poids du massif (considérés de forme parallélépipédique, le poids volumique du béton est 25 kN/m³).

$$q' \cdot L \cdot B = 37356 + 25 \times (4,65 \times 7,2 \times 27,3 + 13,9 \times 6 \times 28,8)$$

Donc $q' \approx 696$ kPa

Pour le calcul de σ'_{v0} on calcule le poids des terres situées au-dessus de la semelle :

$$\sigma'_{v0} = \gamma'_1 \cdot e_1 + \gamma'_2 \cdot e_2 + \gamma'_3 \cdot e_3$$

e_1 , e_2 et e_3 sont les épaisseurs des trois couches de sol ; γ'_1 , γ'_2 et γ'_3 sont les poids volumiques déjaugés des différentes couches de sol.

$$\sigma'_{v0} = 93,8 \text{ kPa}$$

On obtient donc

$$s = 7,1 \text{ cm}$$

Cette méthode élastique est à la limite de son application, les tassements obtenus étant importants. Pour un résultat plus précis, il faudrait prendre en compte des effets plastiques pour le comportement du col, le calcul devient alors plus complexe.

1.2 - Méthode pressiométrique

Le tassement calculé par cette méthode est la somme de deux termes : $s = s_c + s_d$

s_c est un tassement de consolidation, dans la zone située directement sous la semelle.

s_d est un tassement dû à des déformations de cisaillement dans un domaine appelé déviatorique.

² Du nom de Karl von Terzaghi (1883-1963), géologue et ingénieur civil autrichien.

$$s_d = \frac{2}{9.E_d} (q' - \sigma'_{v0}) B_0 \left(\lambda_d \frac{B}{B_0} \right) \alpha$$

$$s_c = \frac{\alpha}{9.E_c} (q' - \sigma'_{v0}) \lambda_c \cdot B_0$$

B : largeur de la semelle.

B_0 : largeur de référence = 0,6 m

q' : contrainte effective moyenne appliquée au sol par la semelle

E_c et E_d : modules pressiométriques moyens pondérés dans les domaines sphériques et déviatoriques (égaux pour un sol homogène).

λ_c et λ_d : coefficients de forme fonction du rapport L/B de la semelle.

On considère ici que le sol est homogène et que le coefficient rhéologique vaut 1/2 (cas défavorable). Le module pressiométrique de la marne calcaire bleue est pris égal à 50 MPa.

On obtient donc $s = 1,4$ cm

Ces deux méthodes dont les hypothèses et les théories utilisées sont différentes, donnent des résultats distincts.

2 – Effet du tassement différentiel sur la structure

Pour calculer les effets du tassement des piles sur la structure, on considère un tassement des deux piles de 10 cm. On majore ainsi le plus grand des résultats obtenus précédemment ; c'est une considération surcotée qui permet de réaliser une application, de considérer son impact et son évolution.

On applique ces déplacements d'appuis au modèle exhaustif de la structure qui a été réalisé à l'aide du logiciel Pythagore [2] par le bureau d'étude AC4S [3]. On considère pour cette vérification que le hourdis n'est pas collaborant.

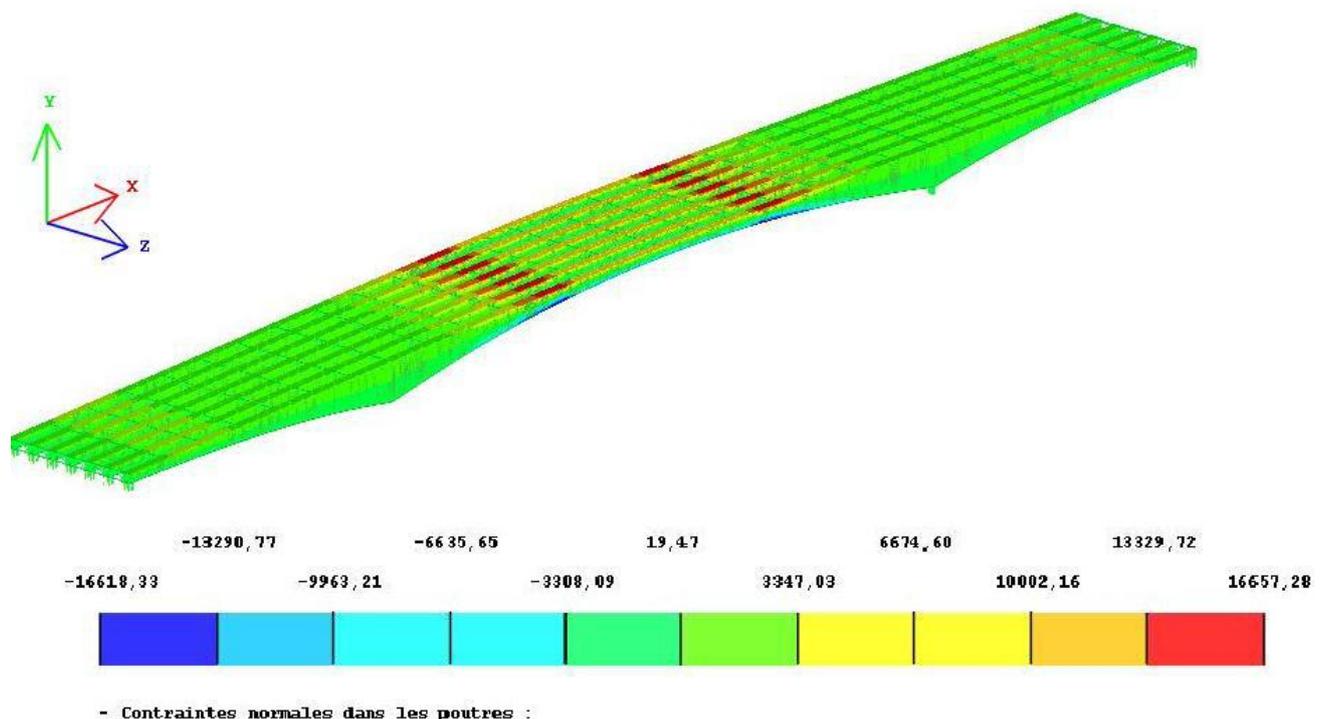


Figure 4 : Contraintes normales (en kPa) dues au tassement des piles

La contrainte maximale obtenue vaut 16,66 MPa et la contrainte minimale vaut -16,61 MPa.

La contrainte normale aux ELS* dans les poutres métalliques est alors vérifiée, en superposant ce chargement avec l'enveloppe des contraintes aux ELS caractéristiques. On veut que :

$$\sigma_{Ed,ser} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M,ser}}$$

$$\gamma_{M,ser} = 1,00 \text{ (NF EN 1993-2 7.3(1))}$$

Les analyses des prélèvements d'acier ont permis de déterminer la nuance des aciers de la charpente métallique : E240 dont la limite élastique est 240 MPa. Ce type d'acier n'est plus utilisé aujourd'hui pour les ouvrages d'art. La nuance minimale pour un ouvrage d'art en construction est de 350 MPa.

La combinaison des deux cas de chargement donne : $\sigma_{max} = 199 \text{ MPa} < f_y = 240 \text{ MPa}$.

La même étude devrait être faite en considérant le tassement sous une seule pile (tassement différentiel).

3 – Conclusion

Cette ressource étudie le tassement des piles par deux méthodes (élastique et pressiométrique) puis vérifie les effets du tassement différentiel sur la structure. À la suite de la ressource « *Étude du renforcement d'un pont mixte* », une autre étude de cas est proposée « *Fatigue de la charpente métallique d'un pont mixte* ».

Références :

[1]: Philipponnat, Gérard, Hubert, Bertrand, Fondations et ouvrages en terre, Paris, Eyrolles, « Blanche BTP », 1997, 576 p.

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

[3]: <http://ac4s.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>