

Travaux sous haute surveillance

Renforcement des fondations de deux piles du pont de Pierre à Bordeaux

Jean-Louis LEDOUX

Ingénieur INSA

Directeur adjoint

de Bordeaux

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées

de Bordeaux

André MASSOUTIER (*)

Ingénieur des travaux publics de l'Etat

Chef de la cellule départementale

des Ouvrages d'art

Direction départementale de l'Équipement

de la Gironde

Introduction

Le pont de Pierre est le premier ouvrage construit au niveau de l'agglomération bordelaise pour permettre le franchissement de la Garonne. Il fait partie du patrimoine historique de la ville. Sa construction a débuté en 1810. Lors de la chute du Premier Empire, elle a été stoppée, puis reprise et terminée par l'architecte Deschamps en 1821. C'est encore aujourd'hui le principal lien de communication urbain (56 000 véhicules par jour) entre les deux rives de la Garonne.

Cet ouvrage en maçonnerie d'une longueur de 486 m comprend seize piles en rivière et deux culées. Les voûtes en arcs de cercle surbaissé ont des portées de l'ordre de 23 m. Les piles comportent des voûtes d'élevation pour minimiser la descente de charge sur les fondations.

Chaque pile repose, par l'intermédiaire d'un caisson en bois rempli de béton de chaux ou de maçonnerie, sur 250 pieux de bois de pin.

Selon les archives, l'ouvrage a souffert depuis sa construction de tassements qui ont affecté principalement les piles proches de la rive gauche.

RÉSUMÉ

En 1993, le pont de Pierre de Bordeaux, ouvrage en maçonnerie datant de 1821, a fait l'objet d'un renforcement de l'assise de deux piles par micropieux. La stabilité précaire de ces appuis était telle qu'ils s'enfonçaient de 1 à 2 cm par an. Compte-tenu du risque de ruine inhérent aux travaux de renforcement, ceux-ci se sont déroulés avec la surveillance continue du comportement de l'ouvrage.

Le dispositif mis en œuvre, essentiellement basé sur la mesure du mouvement vertical des piles, a permis d'optimiser la procédure d'exécution des micropieux et a constitué une aide à la conduite des travaux.

MOTS CLÉS : 61 - 42 - France - Pont - Maçonnerie - Renforcement (gén.) - Pile de pont - Micro - Pieu - Réparation - Sauvetage (ouvrage d'art) - Contrôle - Continu - Comportement - Appareil de mesure - Mouvement - Vertical - // Bordeaux.

(*) Actuellement, chef de la cellule départementale des Ouvrages d'art à la Direction départementale de l'Équipement de la Seine-Maritime.

Un suivi systématique depuis dix ans a montré que, si l'enfoncement ne dépassait pas 1,5 mm par an sur la plupart des appuis, les piles 2 et 3 se sont affaissées de 1 à 2 cm par an entre les années 1990 et 1992 (plus de 50 cm depuis la construction) et que le phénomène paraissait s'accélérer (fig. 1).

Ces tassements s'accompagnent d'une fracturation transversale des fûts de piles qui a conduit à la mise en place de corsets dès 1899 pour la pile 2, et 1910 pour la pile 3.

Enfin, le seuil que constitue l'ouvrage dans le lit de la Garonne a provoqué le creusement d'importantes fosses à l'aval et à l'amont, compte-tenu d'un marnage qui peut atteindre 5 m. Ces fosses atteignent une dizaine de mètres au-dessous du fond moyen du lit et peuvent être situées à plus de 5 m sous la pointe des pieux. Les levés bathymétriques périodiques indiquent un rapprochement progressif des fosses vers l'ouvrage, pouvant mettre en péril les appuis.

L'ensemble de cette pathologie a conduit le comité technique chargé d'examiner la situation de cet ouvrage à proposer à la fois le renforcement de la portance verticale de certains appuis de la rive gauche et la mise à l'étude de la stabilisation des fonds de la Garonne au voisinage de l'ouvrage. Ainsi, en 1992-1993, les piles 2 et 3, dont la stabilité a été jugée la plus précaire, ont fait l'objet de travaux de renforcement par micropieux.

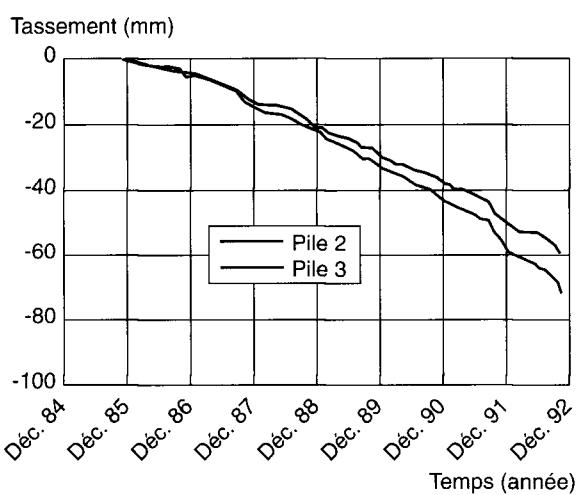


Fig. 1 -
Tassement des
piles 2 et 3 de
1985 à 1992.

Principe des travaux de renforcement des piles 2 et 3

Les 250 pieux d'assise de chaque appui sont fichés dans les matériaux alluvionnaires composés d'un horizon superficiel d'argile molle d'une dizaine de mètres qui recouvre une couche de sable graveleux de 2 m d'épaisseur. Le substratum, une marne du Sannoisien, constitue l'horizon inférieur mécaniquement performant.

Les pieux, dont la longueur est comprise entre 8 et 9 m, ont été battus entièrement dans la couche d'argile molle et leur pointe n'atteint pas la couche sablo-graveleuse porteuse sous-jacente.

L'objet du confortement est la stabilisation des affaissements de ces appuis.

Le coefficient de sécurité en portance verticale de ces piles est estimé entre 1,2 et 1,3 pour une descente de charge de 60 MN environ. Il convient, pour assurer la stabilité des appuis, d'engager des travaux permettant d'atteindre un coefficient de sécurité supérieur à 1,5, soit une augmentation de la force portante des fondations de chaque pile de 18 MN.

L'étude des solutions envisageables a conduit à préférer une solution par micropieux, dont les avantages sont les suivants :

- pas de modification de la géométrie des fûts de pile ni de la protection en enrochements des fondations. Les micropieux sont forés depuis la chaussée à travers le corps de pile et les interventions à partir de la Garonne sont limitées ;
- transfert progressif des charges sur les micropieux en fonction de l'affaissement de l'appui ;
- faible agressivité de la fondation actuelle lors de l'exécution.

Le renforcement est constitué de seize micropieux (armature tubulaire de diamètre 178 mm) de charge nominale 1 500 kN, par pile.

Ce confortement suppose la pérennité de la fondation actuelle sur pieux de bois et la stabilité d'une fondation mixte associant pieux de bois dans l'argile molle et des micropieux ancrés au substratum.

Nécessité du suivi du comportement de l'ouvrage en phase travaux

Pour la phase des travaux, le suivi permanent des mouvements des piles est apparu indispensable pour prévenir des désordres graves qui pourraient provenir de l'influence néfaste, à court terme, des travaux sur la portance précaire des fondations et pour assurer ainsi la sécurité civile (travaux sous circulation) et la pérennité de l'ouvrage.

En effet, l'étude du projet n'avait pas écarté le risque d'une accélération des tassements des appuis pendant les travaux, liée à la perte de portance provisoire ou définitive de certains pieux de bois (diminution du frottement latéral par lubrification, etc.).

Le dossier du marché explicitait très clairement cette situation et impliquait fortement les entreprises dans le suivi du comportement de l'ouvrage afin de mener à bien les travaux.

Objectifs et moyens mis en œuvre pour le suivi des mouvements des piles

Depuis 1982, l'affaissement de certaines piles était suivi à partir de relevés mensuels grâce à la mise en place au droit de l'appui, dans les forages de reconnaissance des fondations, d'un point fixe constitué par une tige métallique scellée dans le substratum [1]. La longue expérience de ce type de relevé (qualité des résultats et pertinence du paramètre mesuré) nous a conduits à mettre en place en avril 1992 un suivi « continu » du mouvement vertical des piles 2 et 3, associé à des mesures de rotation des corps de piles.

Les relevés, avant travaux, du mouvement vertical et des rotations des corps de piles indiquaient :

- une grande sensibilité au phénomène de marée. La figure 2 montre que l'amplitude du mouvement vertical de la pile 3 est de 0,25 mm sous l'effet de la marée ;
- un comportement saisonnier, dont la période la plus marquée était annuelle (phénomène d'étiage) ;

et permettaient d'approcher assez bien, à l'échelle de la journée comme à celle de l'année, le comportement « normal » de l'ouvrage.

Cette référence associée à l'analyse du comportement prévisible sous l'influence des travaux (accélération de l'enfoncement vertical avec éventuellement rotation) nous a conduits à baser sur les mêmes paramètres le suivi du comportement de l'ouvrage en phase de travaux.

Dispositif de mesure

Les paramètres suivis sont :

- le mouvement vertical des deux appuis, au moyen de capteurs de déplacement à induction (sensibilité 1/100 mm),
- la rotation des corps de piles dans deux directions, à l'aide de clinomètres à servo-acceléromètre (sensibilité 10^{-5} rd),
- le niveau d'eau de la Garonne (marnage de 3 à 5 m), au moyen d'un capteur de pression hydraulique (sensibilité 0,01 m),
- la température à l'intérieur de l'ouvrage (dans les élégissements) et dans la structure (corps de pile, voûte).

Le dispositif de scrutation des capteurs d'enregistrement, de traitement et de surveillance comprend :

- une centrale d'acquisition assurant l'interrogation des capteurs et le stockage des mesures, reliée au réseau téléphonique communé ;

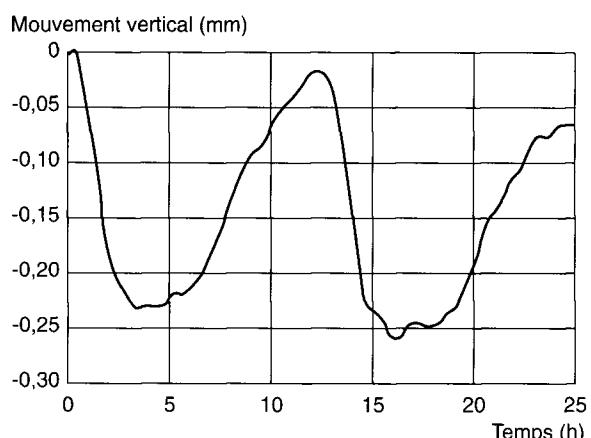


Fig. 2 - Mouvement de la pile 3 pendant un cycle de marée de 25 heures.

- un ou des MINITEL(S), ou micro-ordinateurs permettant la consultation des mesures stockées et le paramétrage de la centrale ;
- un micro-ordinateur affecté à la surveillance de l'ouvrage et assurant :
 - le transfert périodique et automatique des mesures entre l'ouvrage et la cellule départementale des Ouvrages d'art,
 - l'exploitation des mesures (établissement des fichiers, édition des graphiques).

Surveillance pendant les travaux

Objectifs

Le Cahier des clauses techniques particulières des travaux avait prévu que la conduite des travaux serait intimement liée au comportement de l'ouvrage. Ainsi, la période de mise au point de la procédure d'exécution comprenait la réalisation d'un premier micropieus sur chaque pile.

■ **Le premier objectif** de la surveillance était donc de quantifier l'agressivité de chaque phase élémentaire d'exécution d'un micropieus et de comparer différentes technologies de réalisation.

■ **Le second objectif** était de signaler un comportement anormal de l'ouvrage afin d'alerter une cellule de surveillance de l'ouvrage. Cet objectif supposait donc de caractériser le comportement anormal.

Définition des seuils

La maîtrise d'œuvre, après avis du comité technique, a arrêté des seuils d'alerte et d'arrêt du chantier.

■ **Le seuil d'alerte** est une valeur permettant de mettre en action une procédure interne à la maîtrise d'œuvre pour une surveillance renforcée de l'ouvrage.

■ **Le seuil d'arrêt** est une valeur qui déclenche automatiquement l'arrêt des travaux, la surveillance renforcée, et une reprise du chantier après notification par le maître d'œuvre.

Le paramètre choisi pour la définition des seuils est le tassement de l'appui. Les valeurs retenues tiennent compte des vitesses de tassement avant travaux (1 à 2 mm par mois) et d'une durée de travaux estimée de quatre mois (*cf.* tableau ci-après).

Seuil d'alerte	Seuil d'arrêt
<ul style="list-style-type: none"> Tassement de la pile : 1 cm par mois pendant les travaux 	<ul style="list-style-type: none"> Tassement instantané lors de la réalisation d'un micropieus : 1 cm Tassement de la pile après la réalisation d'un micropieus : 1 mm par semaine Tassement total de l'appui pendant les travaux : 5 cm

Organisation de la surveillance

L'organisation de la surveillance implique à la fois le groupement d'entreprises et le maître d'œuvre à partir :

➤ de l'obligation d'un compte-rendu quotidien de la part de l'entreprise et transmis à la maîtrise d'œuvre. Ce compte-rendu fait la comparaison entre les mesures des dernières 24 h et les seuils prédefinis ;

➤ de l'analyse des graphes à la suite de chaque réalisation de micropieus par la cellule départementale des Ouvrages d'art. Celle-ci proposait alors au maître d'œuvre de poursuivre ou de différer d'une semaine l'exécution du micropieus suivant ;

➤ du fonctionnement d'une cellule de suivi, composée de deux personnes appartenant au contrôle externe du groupement d'entreprises et de deux personnes du bureau d'étude de la maîtrise d'œuvre. Cette cellule a pour rôle la valida-

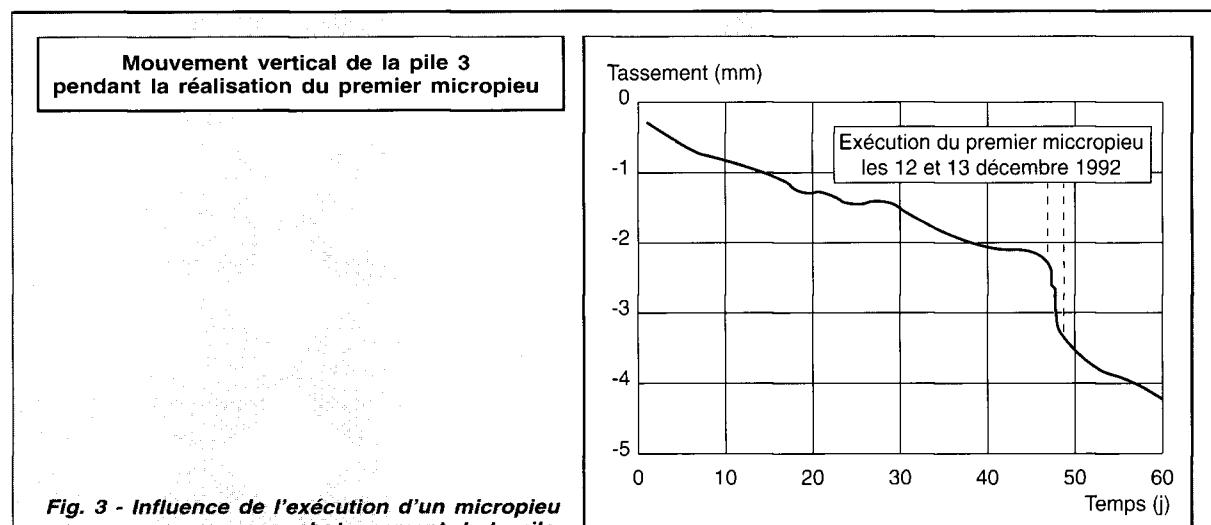


Fig. 3 - Influence de l'exécution d'un micropieus sur le tassement de la pile.

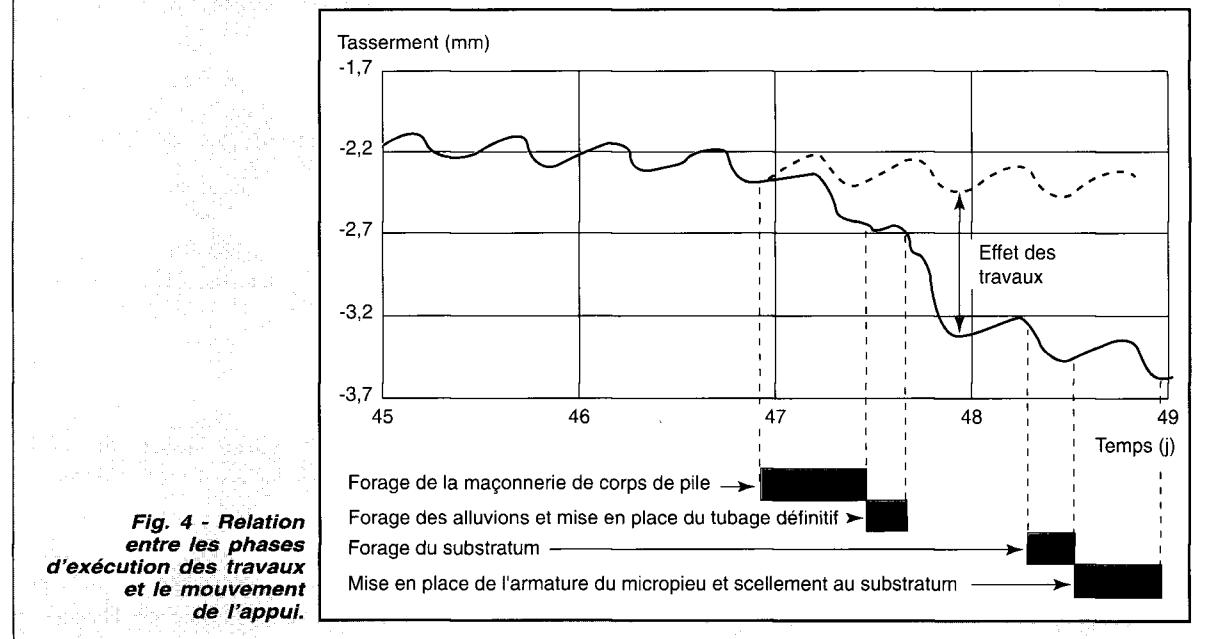


Fig. 4 - Relation entre les phases d'exécution des travaux et le mouvement de l'appui.

tion de l'ensemble des mesures et l'analyse des évolutions probables de l'ouvrage. Cette cellule se réunissait mensuellement et lors de phases particulières de travaux ou de situations critiques (seuil atteint, etc.).

Surveillance de la réalisation du premier micropieu

Les figures 3 et 4 présentent le mouvement vertical de la pile 3 pendant la réalisation du premier micropieu. On remarque :

- la modification très nette du mouvement de l'appui dès le début des travaux, qui conduit à un tassement de 0,8 mm en 24 h et de plus de 1 mm en fin d'exécution ;
- un affaissement sensible (0,2 mm) de l'appui dès la phase de forage à travers la maçonnerie du corps de pile et qui se poursuit pendant toute la phase de forage des alluvions ;
- la stabilisation progressive de l'influence des travaux quand le forage a atteint le substratum. Le retour à un comportement dit normal est intervenu une dizaine de jours après la fin des travaux.

Ce constat a conduit l'entreprise, pour la poursuite des travaux, à utiliser une technique de carottage moins agressive pour la traversée des maçonneries et à modifier l'enchaînement des opérations de forage dans les alluvions, afin de limiter l'affaissement d'appui.

Bilan de la surveillance

(cf. tableau ci-contre et figure 5)

Pour la conduite du chantier, cette surveillance a permis :

- d'optimiser la procédure de réalisation des micropieus (on est passé d'un tassement total de 1 mm à un tassement moyen de 0,6 mm par micropieus) ;
- d'assurer, pour chaque nouveau micropieu, la stabilisation des mouvements générés par les travaux précédents selon les critères définis par la maîtrise d'ouvrage. Ceci a conduit à différer, comme prévu, le scellement des micropieus à la maçonnerie en fin de travaux ;
- de contrôler l'efficacité du renforcement réalisé en suivant la décélération des enfoncements de l'appui après scellement de l'ensemble des micropieus des piles (la stabilisation est obtenue après un affaissement de 5 à 6 mm selon l'appui).

Tassement	Seuil prédefini (mm)	Valeur atteinte (mm) pile 2	Valeur atteinte (mm) pile 3
Tassement mensuel moyen avant travaux		1	1,5
Tassement mensuel moyen pendant travaux	10	3,1	3,6
Tassement instantané lors de l'exécution d'un micropieu	10	mini 0,3 maxi 0,5	mini 5 maxi 1
Tassement pendant une semaine après l'exécution d'un micropieu	1	mini 0,5 maxi 0,8	mini 0,3 maxi 0,8
Tassement total pendant travaux	50	14 (4,5 mois)	20 (5,5 mois)

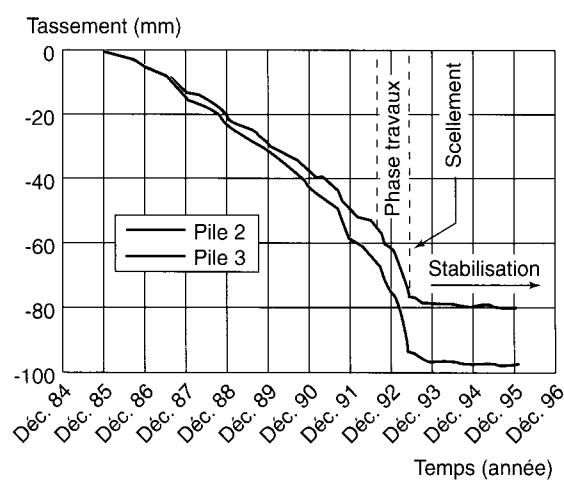


Fig. 5 - Graphes indiquant la stabilisation des deux piles à partir de juin 1993.

Conclusion

Des conditions exceptionnelles de surveillance ont contribué à mener à bien, dans de bonnes conditions de sécurité, des travaux de renforcement extrêmement délicats si l'on tient compte de la précarité de la stabilité des appuis, et du maintien d'une circulation réduite sur le pont pendant les travaux. Le chantier a pu se dérouler en continu les samedis et dimanches, jour et nuit, grâce à des procédures d'exécution bien établies, tout en permettant un suivi permanent de la maîtrise d'oeuvre. Tous les lundis matin, la circulation était rétablie sans aucune restriction.

La technologie de mesure sur ouvrage aujourd'hui disponible a permis de suivre relativement facilement, en temps réel et avec une sensibilité élevée, le comportement de deux piles pendant les travaux et de garantir ainsi le bon état du pont.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] BRU J.-P. (1994), Réalisation de vrais points fixes pour la mesure des tassements des ouvrages en maçonnerie dans les zones soumises au marnage, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **190**, mars-avril, pp. 102-106.
-

ABSTRACT

Closely monitored works - Strengthening the foundations of two bridge piers on the stone bridge in Bordeaux

J.-L. LEDOUX, A. MASSOUTIER

In 1993 the base of two piers of the Pont de Pierre in Bordeaux, a stone structure dating from 1821, was strengthened using micropiles. The stability of these bases was so diminished that they were sinking at a rate of between 1 and 2 cm per year. In view of the risk of total failure during these works the behaviour of the structure was continuously monitored while they were conducted.

The system which was set up was essentially based on measurement of the vertical movement of the piers. It made it possible to optimize installation of the micropiles and assisted the conduct of works.