

VILLE DE PARIS : Travaux de confortement des piles du Pont d'Iéna par micropieux  
AUTEURS : Laurent SAUSSAC, Ingénieur Principal, GEOS Ingénieurs Conseils – Stéphane CURTIL,  
Directeur, GEOS Ingénieurs Conseils

### Présentation de l'ouvrage (chapeau) et problématique

La construction du pont d'Iéna entre l'actuel Champ de Mars et le Palais du Trocadéro s'est achevée en 1814. Il s'agit d'un ouvrage historique en maçonnerie dont les piles reposent sur une centaine de pieux en bois. Entre 1935 et 1937, le pont fut élargi de 19 à 35 mètres par l'ajout de part et d'autre de deux ouvrages latéraux en béton armé habillés d'un parement extérieur en pierre, fondés sur des pieux béton armé battus à l'intérieur d'une enceinte en palplanche et ancrés dans les argiles plastiques. Les trois ouvrages sont composés de 5 arches de 28 m de portée chacune. Les piles de l'ouvrage ancien seront numérotées P1 à P4 de la rive gauche vers la rive droite.

Après la construction, au moment du décintrement des voûtes, des tassements de l'ordre de 10 à 15 cm auraient été observés. En janvier 2012, un système d'instrumentation et d'auscultation par cible topographique a été mis en œuvre afin de contrôler les mouvements de l'ouvrage. Les mesures ont mis en évidence un tassement différentiel sensible entre l'ouvrage en maçonnerie et les élargissements. Les piles P2 à P4 du pont historique ont vraisemblablement tassées de plusieurs dizaines de centimètres depuis les travaux d'extension des années 30 suite à un report de charge du nouvel ouvrage sur l'ancien. Ces déplacements excessifs se sont traduits par des désordres multiples et de plus en plus marqués : fissures longitudinales et transversales au niveau de la chaussée, orniérage et fluage des joints, fractures et déformations au niveau de la maçonnerie. Le suivi de l'auscultation topographique montre que les tassements et les désordres sont évolutifs sans palier de stabilisation des vitesses.

Face à un ouvrage dégradé à la pathologie évolutive, le comité technique chargé d'apprécier les risques techniques associés à cet ouvrage à proposer un renforcement de la portance verticale des trois appuis présentant les tassements les plus importants. La méthode de confortement retenue pour les trois piles P2 à P4 a été la réalisation de micropieux forés depuis la partie supérieure du tablier et traversant toute la maçonnerie historique.



1- Vue du pont depuis la berge sud  
1- View of the bridge from the south bank

### Contexte géologique et géotechnique

Les reconnaissances de sol menées dans le cadre des diagnostics et des études de projet ont mis en évidence la succession des terrains suivants :

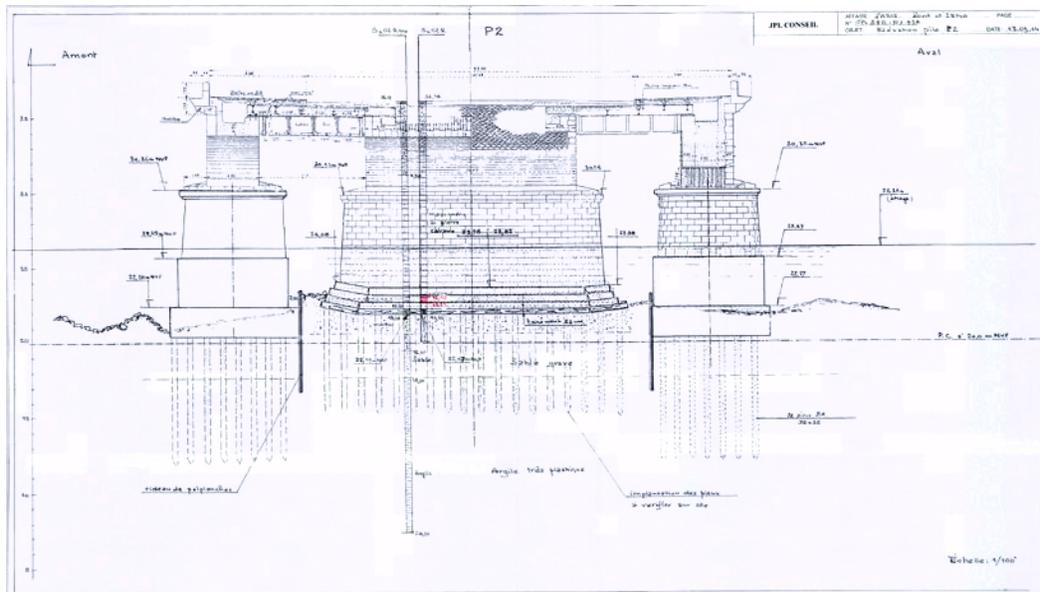
- des Alluvions sablo-limoneuses sur une épaisseur de l'ordre de 3,5 m (jusqu'à 19/20 ortho) avec des caractéristiques mécaniques faibles ( $p_{l_{moy}} = 0,6 \text{ MPa} - E_{M_{moy}} = 5 \text{ MPa}$ ) ;
- Des Alluvions sablo-graveleuses sur 1 à 2 m (jusqu'à 18/19 ortho) avec de bonnes caractéristiques ( $p_{l_{moy}} = 3 \text{ MPa} - E_{M_{moy}} = 20 \text{ MPa}$ ) ;
- L'Argile Plastique jusqu'à 4 ortho avec des caractéristiques croissantes avec la profondeur,  $p_l$  de 0,9 à 2 MPa et  $E_M$  de 8 à 20 MPa ;
- Les Marnes de Meudon qui constituent la couche d'ancrage des micropieux avec de très bonnes caractéristiques mécaniques ( $p_{l_{moy}} > 5 \text{ MPa} - E_{M_{moy}} = 200 \text{ MPa}$ )

### Historique de l'ouvrage – Descente de charge

Les documents d'archives montrent que les pieux bois ont une longueur d'environ 7 m et sont donc ancrés de 2/3 m dans les argiles plastiques assez peu compactes soit vers 16,0 ortho. Les pieux en béton armé battus des élargissements latéraux ont une section de 35 x 35 cm et semblent ancrés plus profondément (arase inférieure variable comprise entre 10,0 et 14,9 ortho).

Les informations recueillies sont celles figurant sur les plans de l'élargissement car aucun plan de l'époque de la construction de l'ouvrage n'a pu être retrouvé.

La descente de charge établie par le bureau d'étude structure montre que les pieux bois reprenaient à l'origine environ 40 t chacun et que l'élargissement, dont une partie du tablier repose sur les piles anciennes, a majoré la charge totale de 30 % pour atteindre approximativement 52 t.



2- Document d'archive – élévation de la pile P2

2- Archive document – stack elevation plan P2

### Analyse des tassements des appuis

L'analyse des différentes inspections menées permet d'estimer les tassements absolus totaux des appuis depuis la construction de l'ouvrage au 19<sup>ème</sup> siècle :

- Culées : tassements faibles
- Pile P1 : 15 cm
- Pile P2 : 45 cm
- Pile P3 : 52 cm
- Pile P4 : 44 cm

La construction de l'élargissement a conduit à une majoration de la descente de charge sur les appuis en maçonnerie. La mesure du basculement des poutres qui supportent la chaussée entre la partie centrale en maçonnerie et les élargissements permet d'estimer la part de tassement produite depuis 1937, date de la fin des travaux de doublement des voies:

- Pile P1 : 4 cm
- Pile P2 : 22 cm
- Pile P3 : 34 cm
- Pile P4 : 18 cm

Les piles P2 à P4 ont ainsi acquis la moitié des tassements depuis la construction de l'élargissement sous un accroissement de charge totale de 30 % seulement ce qui montre qu'on est probablement dans une phase fluage après consolidation ou après passage dans le domaine élastique.

Le suivi topographique mis en œuvre en 2012 a montré qu'au bout d'un an les piles P2 et P3 avaient tassées de 5 mm supplémentaires alors que les autres appuis n'ont pas montré de mouvements importants. Il apparaît donc que les tassements ne sont pas stabilisés ce qui nécessite la mise en œuvre

rapide d'un confortement.

L'étude des solutions envisageables a abouti à une solution de reprise des charges par micropieux car :

- L'intervention peut se faire depuis la chaussée, limitant ainsi les travaux depuis la Seine et n'imposant qu'une restriction ponctuelle de circulation,
- Le transfert des charges se fera progressivement des pieux bois vers les fondations complémentaires,
- L'impact sur les pieux bois reste faible au regard d'autres techniques comme le jet-grouting,
- Les reconnaissances ont montré que la maçonnerie des piles présentait un bon état général et qu'elle pouvait donc assurer le transfert des charges vers les micropieux qui les traverseraient

### Dimensionnement

Les études géotechniques G2-PRO ont montré que les coefficients de sécurité par rapport à la charge de rupture en termes de portance étaient de 1,4 vis-à-vis des charges totales et 1,7 vis-à-vis des charges permanentes seules. L'objet du confortement est la stabilisation des affaissements des trois appuis sur lesquels les tassements les plus importants ont été mesurés. Pour assurer la stabilité de ces piles, un coefficient de sécurité de 2 par rapport à la charge de rupture en portance est recherché, soit une augmentation du coefficient de sécurité de 40%.

### Principe des travaux de confortement

La solution retenue en phase projet a été la réalisation de 12 micropieux à travers de chacune des trois piles P2 à P4 depuis la chaussée. La mission G4 de suivi géotechnique de l'exécution a été assurée par GEOS Ingénieurs Conseils en collaboration avec la maîtrise d'œuvre générale de la Ville de Paris. L'entreprise en charge de la réalisation des micropieux était l'entreprise SPIE Fondations.

La charge à la rupture unitaire recherchée par micropieux était de 325 tonnes ce qui a conduit à un dimensionnement de micropieux de type 3 de 46 m de longueur ancrés de 13 m dans les marnes raides avec un scellement dans la maçonnerie de la pile sur 12 m (tubes 139,7 mm et d'épaisseur 20 mm frettés par soudage de spires HA pour assurer de transfert de charge de l'ouvrage vers les micropieux et des micropieux vers le sol).



3- Tubes avec frettage dans la zone de scellement dans la maçonnerie des piles

3- Tube with hoop in the sealing area in the masonry of the piers

Afin de valider la valeur du frottement latéral ( $q_s$ ) dans les Marnes de Meudon, sous les Argiles Plastiques, un micropieu d'essai préalable à la rupture a été réalisé depuis les quais de la rive gauche au niveau de la culée du pont. L'analyse de la diagraphie du forage a permis de déterminer la limite argiles/marnes afin d'assurer un scellement dans la bonne couche d'ancrage.

L'essai est classiquement effectué par l'intermédiaire de câbles de précontrainte scellés à l'intérieur du tube. Une fois le micropieu injecté, les câbles composés d'une partie scellée et une partie libre gainée graissée ont été introduits à l'intérieur du tube dans le coulis de scellement frais avant la prise.

L'essai a consisté à appliquer une traction sur le tube de micropieu par l'intermédiaire d'un vérin et à mesurer le déplacement du tube d'armature en tête de micropieux jusqu'à la traction d'épreuve si possible (de l'ordre de 200 t) ou la rupture par défaut d'adhérence du micropieu au terrain.

L'essai a été conduit jusqu'à la traction d'épreuve sans que le déplacement limite n'ait été atteint et sans apparition du fluage ce qui a permis de valider un  $q_s$  de 450 kPa qui confirme la valeur retenue dans les études de projet de 300 kPa.



4- Vérin mis en œuvre pour le micropieu d'essai

4- Cylinder used for the test micropile

La procédure de réalisation mise en œuvre par SPIE Fondations était la suivante :

- Réalisation d'un avant trou de reconnaissance au tricône, à l'eau, en diamètre 90 mm avec enregistrement des paramètres de forage jusqu'au platelage bois situé sous les piles pour vérifier si l'implantation du micropieu est à l'aplomb ou non d'un pieu bois,
- Carottage au carottier, à l'eau, en 250 mm avec contrôle de verticalité jusqu'à la base du platelage bois,
- Forage dans le terrain, sous fluide de forage, au trilame perdu de diamètre 200 mm,
- Substitution du fluide forage par le coulis de scellement, mise en place de l'armature et injection de scellement. Pour l'exécution des micropieux de l'ouvrage, compte tenu de la hauteur importante de scellement, il a été prévu une injection type IGU renforcé en effectuant l'injection à l'obturateur simple en 5 passes remontantes de 6 ml environ.



5- Opération de forage des micropieux

5- Micropile drilling operation

Etant donné la sensibilité de l'ouvrage et préalablement à tous travaux de forage, un cerclage métallique des piles sur trois niveaux avec barres d'ancrage horizontales a été mise en œuvre. La position des pieux bois d'origine de chaque appui a été relevée par des reconnaissances subaquatiques.



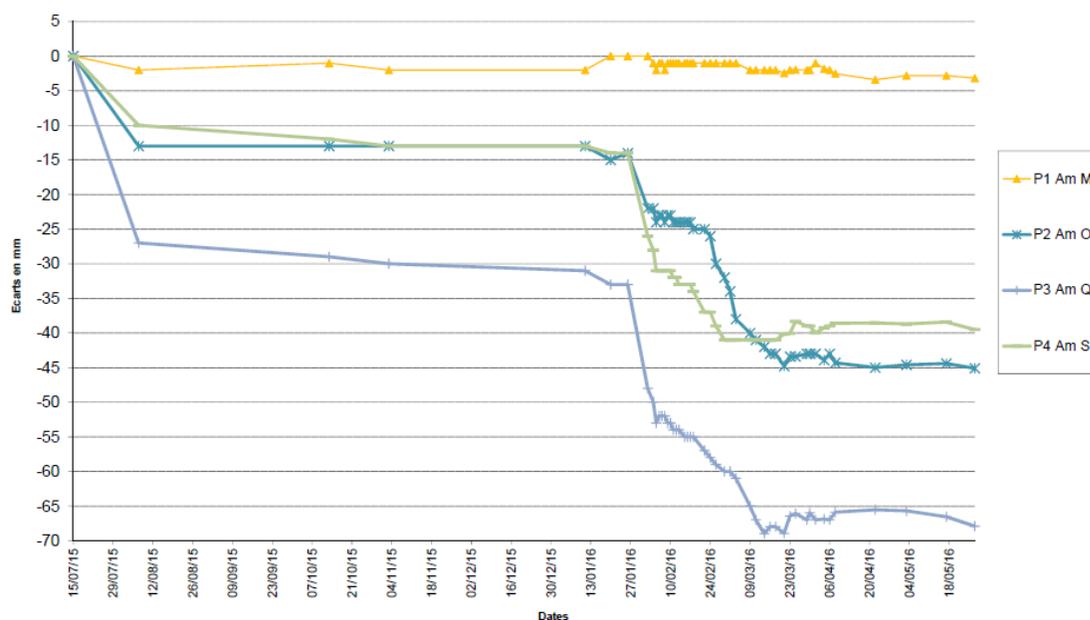
6- Cerclage des piles  
6- Strapping of the piles

Pendant toute la durée des travaux les mesures d'auscultation des mouvements de l'ouvrage se sont poursuivies avec des mesures quotidiennes pendant les phases critiques et deux mesures par semaine pour les autres phases. Les mesures sont réalisées à partir de cibles topographiques fixées sur l'ouvrage. Le dispositif comprenait 4 cibles par culée, 2 cibles par pile historique et une cible par pile construite lors de l'élargissement. Des repères fixes ont également été relevés au niveau des quais. L'interprétation des mesures en relation avec les différentes phases de travaux a été faite en continu pendant les travaux dans le cadre de la mission géotechnique G4 de GEOS Ingénieurs Conseils.

L'étude de projet avait souligné le risque d'une possible accélération des tassements des appuis liés à une perte de capacité portante suite à une réduction du frottement latéral par un remaniement du sol autour des pieux bois au moment du forage des micropieux.

La surveillance pendant les travaux devait permettre de contrôler l'impact de la réalisation des micropieux et de prévenir des tassements anormaux liés à des aléas de travaux qui n'auraient pas été anticipés.

Les travaux de carottage des piles n'ont pas eu de conséquences sur le comportement de l'ouvrage (pas de mouvement significatif). Par contre les premiers forages dans le terrain ont conduit à des pertes importantes de fluide de forage au niveau de l'interface platelage bois/terrain à la base des piles qui se sont traduites par une forte accélération des vitesses de tassements des appuis : en une semaine 8 à 9 mm au niveau de P2, 14 à 15 mm au niveau de P3 et 12 à 13 mm au niveau de P4. Le fluide de forage, en charge jusqu'au niveau du tablier du pont, soit plus de 10 m au dessus du niveau de la Seine, a provoqué un effet de chasse sur le mortier de pose altéré et sur les terrains sableux sous la base de la pile. Ce phénomène de perte de capacité portante sous la base des piles, conjugué avec les pertes de frottement latéral des pieux bois suite au remaniement des argiles au cours du forage est à l'origine des tassements importants mesurés (25 à 30 mm) qui se sont poursuivis jusqu'à la mise en œuvre et au scellement des armatures des micropieux.



## 7- Suivi topographique du déplacement vertical des piles 7 - Topographic tracking of vertical stack displacement

Ces pertes totales de fluide de forage sous la base des piles étaient une alerte forte quant au risque de défaut de scellement des micropieux en partie haute au niveau de la maçonnerie. Une adaptation de la procédure a été proposée et validée par la Maîtrise d'œuvre et par GEOS Ingénieurs Conseils.

Lorsque des pertes significative étaient constatées au forage, celui-ci était alors arrêté de manière à procéder à une injection de comblement au moyen d'un coulis ciment-bentonite chargé au sablon, mis en œuvre gravitairement depuis la base de l'outil de forage avec pour objectif de combler les vides et consolider les terrains décomprimés à l'interface platelage entre le platelage bois de fondation et les terrains. L'injection est stoppée lorsqu'une résurgence au niveau de la chaussée est constatée ou lorsque le volume de coulis injecté par le train de tige atteint 1 m<sup>3</sup>. En absence de résurgence, l'opération est renouvelée. Si le volume total de 2 m<sup>3</sup> est atteint sans résurgence, un adjuvant silicaté est alors ajouté au coulis pour accélérer la prise. Au final ces opérations de traitement préalables a conduit à la mise en œuvre de plus de 100 m<sup>3</sup> de coulis-sablon pour les trois piles confortées.



8- Mobilisation de deux ateliers de forage suite aux pertes de fluide de forage

8- Mobilization of two drilling rigs due to drilling fluid losses

Cette opération de confortement des fondations historiques par pieux bois a permis de stabiliser rapidement les tassements et d'apporter un confortement fiable à long terme.

Le comportement historique constaté des fondations avec un fluage continu était un indice robuste de l'état de stabilité critique de l'ouvrage dont la capacité portante des fondations mobilisait à la fois les pieux bois (fondations profondes) avec report d'une partie des charges en profondeur et les sols sous le platelage en bois (fondations superficielles). La perte de cette composante de portance des terrains superficiels en cours de travaux a immédiatement induit un report de charge sur les pieux bois avec accélération des déformations et du fluage. Face à une situation critique de déstabilisation des fondations, les injections de comblement et de traitement engagées en cours de chantier ont apporté une solution géotechnique adaptée de confortement provisoire de l'ouvrage permettant la poursuite des travaux de renforcement par micropieux.

### Bilan des travaux

La stabilité du pont d'Iéna, ouvrage emblématique de la ville de Paris inscrit au titre des monuments historiques, était compromise par un mécanisme de report des charges des élargissements de 1935 sur l'ouvrage initial datant du début du 19<sup>ème</sup> siècle en maçonnerie fondé sur pilotis bois.

Le diagnostic préalable a montré que l'ouvrage a subi des dommages importants (fissures, épaufrures, torsion des poutres métalliques...) qui sont apparus progressivement sur les deux parties du pont nécessitant une intervention programmée.

Compte tenu des contraintes liées aux travaux en Seine, la technique de confortement retenue a été la mise en œuvre de 3 séries de 12 micropieux réalisés depuis la chaussée sur trois des quatre piles de l'ouvrage ancien.

L'altération du sol sous le platelage bois des piles avec le courant de la Seine, la possible dégradation des pieux bois au fil des ans et le remaniement des terrains, jusqu'ici confinés, au moment du forage des micropieux ont conduit, en cours de travaux, à des pertes de fluide de forage puis de coulis de scellement et à des tassements inattendus marqués. Dans ce contexte la mission G4 de supervision géotechnique de l'exécution confiée par la Mairie de Paris à GEOS Ingénieurs Conseils a trouvé tout son sens puisqu'elle a été le garant d'une excellente réactivité pour l'interprétation des phénomènes géotechniques inattendus, pour la définition des mesures compensatoires d'urgence pour la préservation de l'ouvrage et pour l'accompagnement de l'Entreprise XXXX dans la définition des adaptations des méthodes des travaux géotechniques spéciaux. Cette démarche de suivi intégré du comportement géotechnique de l'ouvrage en lien étroit avec les services de Maitrise d'œuvre de la Mairie de Paris a permis de prendre rapidement les mesures conservatoires adéquates afin de garantir le bon achèvement des travaux de mise en place des micropieux et la pérennité à long terme de l'ouvrage.

11- Vue en coupe du quai  
11- Sectional view of the dock

### Quelques chiffres...

- Forage micropieux : 36 unités d'une hauteur moyenne de 46 m, soit 1 656 ml de forage.
- Armatures micropieux : tubes 139 mm épaisseur 20 mm soit 97 t d'acier
- Volume moyen de comblement sous les piles : 100 m<sup>3</sup> de coulis BC + sablon
- Durée des travaux : 2 x 7 semaines environ.

### Principaux intervenants

- Maître d'ouvrage : Mairie de Paris
- Maître d'œuvre général : Mairie de Paris - Service du Patrimoine de Voirie - Section Seine et Ouvrages d'Art
- Maître d'œuvre géotechnique suivi de chantier GEOS Ingénieurs Conseils
- Maître d'œuvre géotechnique études : Fondasol
- Entreprise : SPIE Fondations mandataires
- Mesures et instrumentation: SITES

### Crédit photo

- 1 : © GEOS INGENIEURS CONSEILS
- 2 : © Document d'archive
- 3 : © GEOS INGENIEURS CONSEILS
- 4 : © GEOS INGENIEURS CONSEILS
- 5 : © KELLER FONDATIONS SPECIALES
- 6 : © GEOS INGENIEURS CONSEILS
- 7 : © SITES
- 8 : © GEOS INGENIEURS CONSEILS

Résumé:

Les désordres et affaissements importants constatés sur le Pont d'Iéna par les services de la Mairie de Paris ont conduit la ville à engager des travaux de renforcement de grande ampleur pour stabiliser

l'ouvrage. La reprise en sous-œuvre par micropieux des piles les plus impactées par les tassements a nécessité la mise en place d'une auscultation continue du pont qui a contribué au suivi du comportement de l'ouvrage en cours de travaux permettant de mener à bien les travaux de stabilisation en adaptant en temps réel les procédures d'exécution lors des phases d'accélération des tassements ou de dépassement des seuils admissibles. Désormais ancrées de plusieurs mètres dans la couche raide des Marnes de Meudon, les nouvelles fondations du pont vont permettre de stabiliser les tassements de l'ouvrage ouvrant ainsi la voie aux travaux de restauration et régénération de la maçonnerie.

The major disorders and subsidence observed on the Pont d'Iéna by the services of the Paris City Hall led the city to undertake major reinforcement works to stabilize the structure. The micropile recovery of the piles most affected by settlements required constant monitoring of the bridge, which helped to complete the stabilization works and adapt in real time the execution procedures in the event of acceleration of movements or exceeding of the permissible thresholds. The new foundations of the bridge, now anchored several meters in the steep layer of the Marnes de Meudon, will stabilize the settlement of the structure, thus paving the way for restoration and regeneration of the masonry