



© CÉDRIC HELSLY

PARIS XIII^e - BASSIN AUSTERLITZ - ESSAI DE CHARGEMENT SUR BARRETTE

AUTEURS : TONY PEREIRA CORREIA, RESPONSABLE TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MAXIME FONTY, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SOLETANCHE BACHY FRANCE - SABIKA GHEGEDIBAN, CHEF DE PROJET, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MICHEL MARON, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, SPÉCIALISTE DES ESSAIS DE PIEUX, FUGRO - BAO-ANH NGUYEN, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SEFI INTRAFOR

LA VILLE DE PARIS, DANS LE CADRE D'UN PLAN D'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DES EAUX DE LA SEINE ET DE LA MARNE, RÉALISE UN BASSIN DE STOCKAGE EN AMONT DU PONT D'AUSTERLITZ AFIN DE RÉDUIRE LE DÉVERSEMENT DES EAUX DU RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT LORS DE FORTS ÉPISODES PLUVIEUX. CET OUVRAGE DE GRANDE DIMENSION EST SOUMIS À DES SOUS-PRESSIONS IMPORTANTES. POUR OPTIMISER LA PROFONDEUR DES FONDATIONS D'ANCRAGE DU RADIER, UN ESSAI DE CHARGEMENT A ÉTÉ RÉALISÉ SUR UNE BARRETTE EN RECOURANT À LA MÉTHODE DES O-CELLS : UNE PREMIÈRE EN FRANCE !

PRÉSENTATION DU PROJET

La Section d'Assainissement de la Ville de Paris a confié au groupement Impluvium (regroupant les entreprises Urbaine de Travaux (mandataire), Sade, Bessac, Soletanche Bachy France et Sefi-Intrafor) la réalisation d'un bassin de stockage et restitution d'eau (le bassin Austerlitz), ainsi que deux ouvrages

de récupération des eaux depuis les déversoirs d'orage se trouvant de part et d'autre de la Seine (puits Valhubert et puits Tournaire) (figure 2). L'objectif de ces travaux est de :

→ Supprimer les déversements actuels d'eaux usées du réseau d'assainissement parisien par temps de forte pluie ;

1- Vue aérienne de la perforation des barrettes.

1- Aerial view of barrette drilling.

→ Améliorer la qualité sanitaire de l'eau de Seine en amont du Trocadéro, en vue de l'organisation d'épreuves de natation dans la Seine lors des J.O. de 2024 et de l'installation de lieux de baignades pérennes dans la Seine à Paris.

La maîtrise d'œuvre Artelia - Prolog de l'opération est accompagnée par



Icaruss pour la géotechnique. La mission de supervision d'exécution géotechnique G4 est réalisée par Terrasol. Btp Consultants intervient en tant que bureau de contrôle. Les études d'exécution du bassin sont réalisées par Enser pour la partie génie civil et par les bureaux d'études intégrés des entreprises de fondations spéciales. Les travaux ont démarré en août 2020 pour une durée de 44 mois, l'objectif étant de terminer avant mai 2024.

2- Localisation des ouvrages.
3- Coupe du projet prévu initialement.

2- Location of the works.
3- Cross section of the initially planned project.

CARACTÉRISTIQUES DES OUVRAGES

Le projet nécessite de réaliser principalement les travaux de génie civil suivants :

- Un bassin de stockage et restitution d'une capacité de 46 000 m³ situé en rive gauche de la Seine au droit du square Marie Curie dans le XIII^e arrondissement de Paris. L'ouvrage circulaire de 50 m de diamètre est réalisé à l'abri d'une paroi moulée de 1,2 m d'épaisseur descendue à 62 m de profondeur.
- Un ouvrage de prise d'eau situé en rive gauche de la Seine, place Valhubert dans le XIII^e arrondissement de Paris : le puits Valhubert, de 6,5 m de diamètre, est réalisé en paroi moulée de 0,8 m d'épaisseur et de 41 m de profondeur. Il sera connecté au déversoir d'orage existant Buffon, nécessitant des travaux de jet grouting.
- Un ouvrage de prise d'eau situé en rive droite de la Seine, au droit de la voie Mazas dans le XII^e arrondissement de Paris : le puits Tournaire sera raccordé aux collecteurs Diderot et Rapée. Il est réalisé par un terrassement en tranchée blindée à l'abri d'une enceinte constituée de colonnes en jet grouting.
- Un collecteur DN 2500 mm réalisé par fonçage au micro-tunnelier depuis un puits de départ positionné à côté du bassin. Le puits de 11 m de diamètre est réalisé en paroi moulée de 1 m d'épaisseur.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE & HYDROGÉOLOGIQUE

La zone de travaux du bassin se trouve au droit du square Marie Curie sur une esplanade située devant l'entrée de l'hôpital de la Salpêtrière. Les mitoyens en présence sont le viaduc de la Ligne 5 du métro aérien et un bâtiment R+2 de l'hôpital. Les terrains rencontrés sur cette emprise comprennent une frange de Marnes et Caillasses et de Calcaire Grossier sous couvertures alluvionnaires. Puis viennent les couches de l'Yprésien (Sables Supérieurs, Fausses Glaises, Sables d'Auteuil, Argiles Plastiques), et enfin les terrains d'ancrage des fondations projetées, les Marnes de Meudon et la Craie Campanienne. Les nappes en présence au droit du site sont la nappe du Lutétien, en relation directe avec la Seine, avec un niveau d'Eaux Basses situé à la cote 28,9 NGF et la nappe de la Craie en charge sous les Argiles Plastiques, avec un niveau d'Eaux Basses à 27,7 NGF (figure 3).

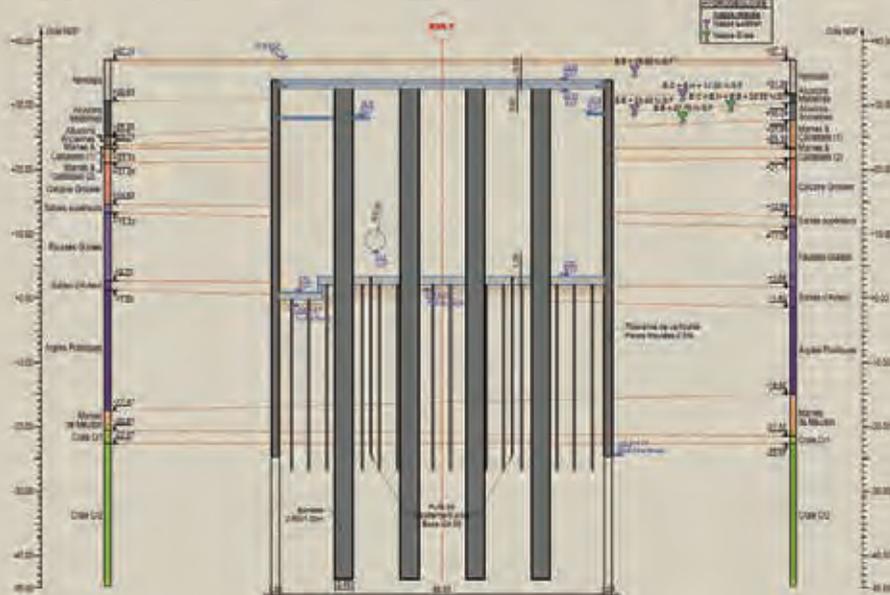
FONDATIONS NÉCESSAIRES À L'ANCRAGE DU BASSIN DE STOCKAGE

Une problématique récurrente de ce type d'ouvrage évidé et s'inscrivant dans un milieu saturé concerne la justification du non-soulèvement de l'ouvrage. Deux solutions peuvent être envisagées. La première consiste en un pompage permanent sous le radier permettant d'annuler les sous-pressions s'exerçant sur l'ouvrage. Si ce pompage dans le milieu naturel ne peut être maintenu sur la durée, alors le radier doit résister aux sous-pressions. Dans ce dernier cas, si le poids de l'ouvrage ne contrebalance pas la poussée d'Archimède, il est nécessaire d'ancrer le radier par l'intermédiaire de fondations qui mobilisent par frottement un poids de terre contribuant à l'équilibre vertical de l'ouvrage.

Dans le cas du bassin Austerlitz, d'autres considérations interviennent dans la conception de l'ouvrage : d'abord, la dalle de couverture doit être réalisée avant les terrassements pour libérer de l'emprise, ce qui implique la réalisation de préfondés pour appuyer la dalle. Ensuite, le fond de fouille est positionné juste au-dessus des Argiles Plastiques sujettes à un possible gonflement.

Tous ces éléments ont amené la maîtrise d'œuvre à retenir un vide sanitaire de 0,5 m sous le radier et un mode de fondation mixte de ce dernier avec des micropieux et des barrettes, ▷

COUPE DU PROJET PRÉVU INITIALEMENT



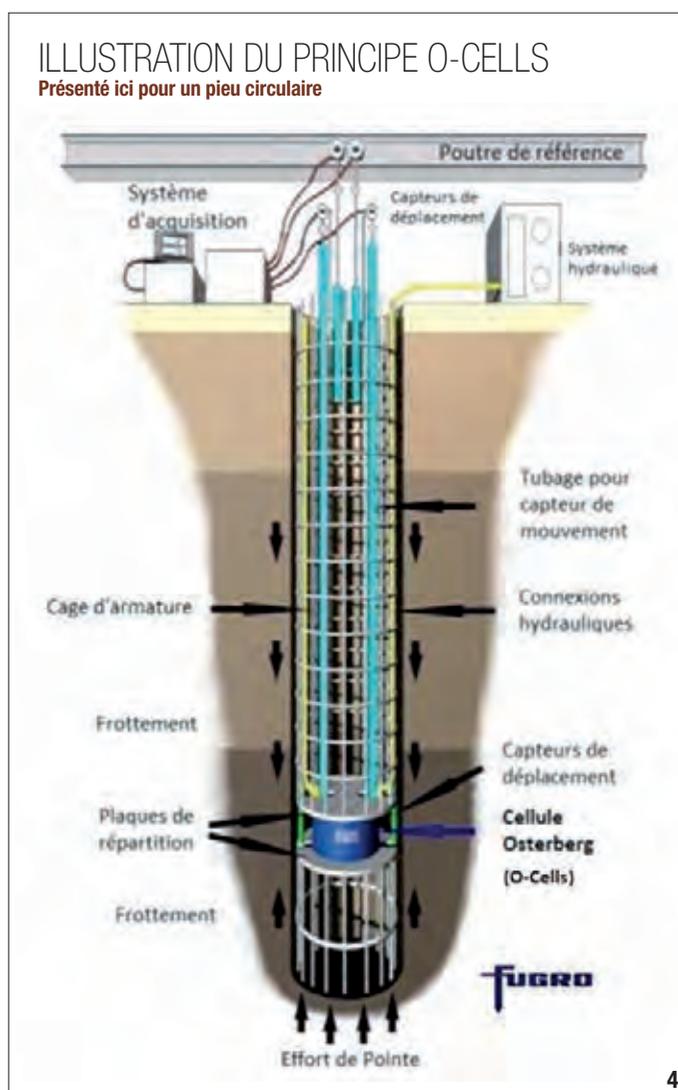
traversant les Argiles Plastiques et s'ancrant dans les Marnes de Meudon et la Craie Campanienne. Les barrettes servent de fondation à la dalle de couverture lors des phases de terrassement. Lorsque l'ouvrage est soumis aux sous-pressions s'appliquant sous le radier, les barrettes drainent une part importante des efforts de traction, du fait de leur forte raideur relativement à celle des micropieux. Enfin, en lien avec le gonflement possible des Argiles Plastiques, une force ascendante transmise aux fondations par frottement dans cette formation est également prise en compte.

Dans le cadre du dimensionnement de ces fondations, il faut rappeler que la norme d'application nationale de l'Eurocode 7 pour les fondations profondes (NF P 94-262) incite fortement à réaliser des essais pour valider les frottements limites pris en compte : si la fondation ne fait pas l'objet d'essais, la norme borne la résistance en traction de la fondation en situation d'État Limite de Service Quasi-Permanent à 0,15 fois la résistance en frottement limite. Les essais sur fondations, bien que répandus pour les micropieux, sont peu courants pour les pieux, et encore moins pour les barrettes, en lien avec les efforts à développer. Toutefois, compte tenu de l'enjeu et afin d'optimiser les fondations de type barrette, forées sous boue bentonitique, le marché a inclus dans la réalisation un essai de traction par la méthode des O-Cells. Ce type d'essai mené sur une barrette est une première en France et a été mis en œuvre par l'entreprise Fugro. L'essai est décrit ci-après.

La réalisation de la fondation qui fera l'objet d'un essai de chargement doit être mise en œuvre en début de travaux. Cela nécessite donc de mobiliser des moyens en amont des travaux de l'ouvrage, ce qui peut être coûteux (amené repli spécifique, immobilisation...). Dans le cadre du bassin d'Austerlitz, l'impact économique de cette mobilisation anticipée a été réduit par un enchaînement favorable des travaux : la barrette d'essai est réalisée dans un premier temps. Les travaux de paroi moulée du bassin, dont le dimensionnement ne tient pas compte des résultats d'essais, se poursuivent pendant 4 mois. Durant cette période, le béton de la barrette d'essai monte en résistance (1 mois), l'essai de chargement est conduit pendant 2 à 3 jours, et les résultats font l'objet d'un rapport d'analyse (3 à 4 semaines). Ensuite, le dimensionnement des fondations est

ILLUSTRATION DU PRINCIPE O-CELLS

Présenté ici pour un pieu circulaire



4

© FUGRO LOADTEST

actualisé et approuvé par les différentes parties durant les deux mois restants. Immédiatement après la fin de réalisation de la paroi moulée du bassin, les barrettes ont pu être progressivement forées et bétonnées en parallèle des panneaux de paroi du puits d'attaque au cours d'une seconde phase travaux de 3 mois (figure 1).

L'ESSAI O-CELLS

DISPOSITIF MIS EN ŒUVRE

La méthode de chargement mise en place pour le projet est appelée "essai bi-directionnel" ou "essai O-Cells". Elle a été développée par le docteur J.O. Osterberg de l'Université Northwestern de Chicago en 1989 et utilisée depuis pour tester des milliers de fondations à travers plus de 60 pays. Le principe de l'essai est l'encastrement, dans la fondation elle-même, d'un ou plusieurs

4- Illustration du principe O-Cells présenté ici pour un pieu circulaire.

5- Insertion de la cage équipée.

4- Illustration of the O-Cells technique shown here for a circular pile.

5- Insertion of the fitted rebar cage.



5

© FUGRO, MICHEL MARON

vérins spécifiquement conçus pour cet usage. L'essai utilise ainsi la réaction de la fondation elle-même pour développer la charge nécessaire sur l'autre partie de la fondation et en déterminer les paramètres de sol recherchés. En complément des vérins encastrés, six niveaux de six jauges de déformation ont été répartis dans la barrette pour évaluer la dissipation des frottements par le sol. Enfin, plusieurs capteurs de déplacement, appelés piges, mesurent les déplacements en tête, en pointe, et à différents endroits de la barrette. Ces capteurs offrent une redondance pour l'appréciation des courbes

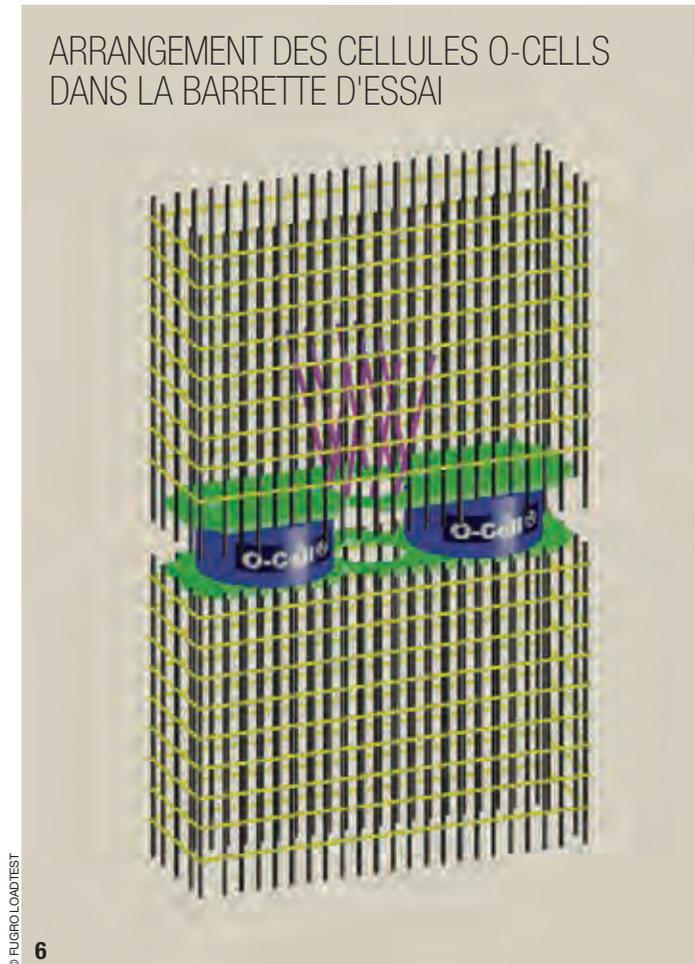
6- Arrangement des cellules O-Cells dans la barrette d'essai.

7- Tête de la barrette d'essai avec instrumentation en place.

6- O-Cells arrangement in the test barrette.

7- Head of the test barrette with instrumentation in place.

ARRANGEMENT DES CELLULES O-CELLS DANS LA BARRETTE D'ESSAI



© FUGRO LOADTEST

6

efforts - déplacements des jauges, et sont indispensables pour caractériser la pointe. La figure 4 illustre le principe de l'essai O-Cells.

L'utilisation de cette méthode, reconnue par la norme NF EN ISO 22477-1, s'est imposée au projet pour pouvoir caractériser les frottements dans les craies situées entre les cotes -21 m NGF et -22,7 m NGF, soit 58 m à 60 m sous le terrain naturel. L'avantage principal de ce dispositif O-Cells est l'application de la charge directement dans les couches d'intérêt et l'absence de massif de réaction, facteur souvent limitant de la charge maximale pour les essais conventionnels avec chargement en tête.

Le choix du calage altimétrique des cellules O-Cells est crucial pour obtenir la rupture recherchée dans l'horizon d'intérêt et ainsi remplir les objectifs de l'essai. Ce positionnement nécessite une très bonne appréciation des paramètres de sol ainsi que leur niveau de fiabilité. Ainsi, pour ce projet, les cellules O-Cells ont été positionnées à la cote -26,70 m NGF permettant d'estimer une résistance de frottement et de pointe combinée sous les cellules de 43,3 MN. Cette résistance représente la réaction disponible à l'essai.

▷



© CEDRIC HELSLEY

7

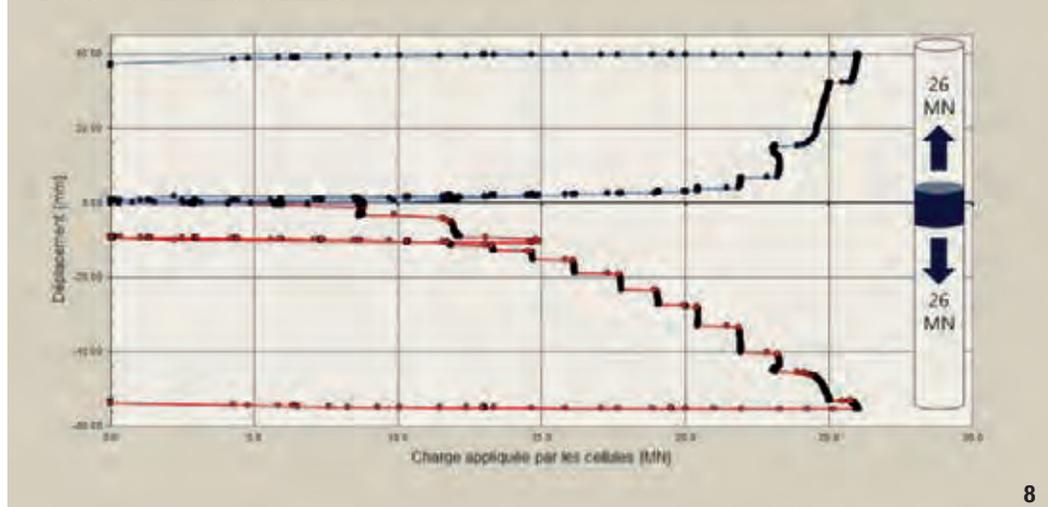
Il s'agit de vérifier que cette réaction disponible est supérieure à la résistance de la partie de sol à tester, située ici au-dessus des cellules. Plusieurs facteurs peuvent permettre d'obtenir cette vérification. Premièrement, due à l'incertitude sur les paramètres de sol issus des reconnaissances, une majoration des résistances de la partie à tester a été considérée pour la conception de l'essai. Ainsi, le frottement dans les craies situées au-dessus des cellules a été pris à 400 kPa. Deuxièmement, le concept de l'essai O-Cells ne nécessite pas un bétonnage de la barrette jusqu'à la surface. Il a ainsi été proposé d'arrêter ce bétonnage à la cote 3,5 m NGF, soit 33,7 m sous la plate-forme de travail. Cet arrêt précoce de bétonnage a pour effet de réduire la surface frottante et donc la résistance au-dessus des cellules, ainsi que le poids de la barrette, agissant contre l'effort appliqué. De plus, la cote haute de bétonnage de l'essai était bien en accord avec la conception des barrettes de l'ouvrage. Sur la base de la conception décrite ci-dessus, un système O-Cells placé à -26,7 m NGF et composé de deux cellules O-Cells de diamètre 690 mm a été sélectionné (figures 5 et 6). La figure 7 montre le dispositif de tête avec l'instrumentation en place.

DÉROULEMENT DE L'ESSAI : PRÉSENTATION DES RÉSULTATS FACTUELS

Le programme de chargement exécuté est composé de 18 paliers réguliers jusqu'à une charge maximale de 26,04 MN. À cette charge, l'ouverture des cellules était de 95,25 mm répartie entre 55,49 mm de déplacement sous les cellules et 39,76 mm de déplacement au-dessus des cellules. La figure 8 présente les courbes des déplacements enregistrés de part et d'autre du système O-Cells en fonction de la charge appliquée.

Des jauges de déformations, réparties tout au long de la barrette, ont permis d'évaluer l'effort repris depuis le point d'application de la charge jusqu'à la cote supérieure du béton. De même, à l'aide du module du béton et de la section de la fondation, il est possible de déterminer le déplacement au niveau des jauges et d'établir les courbes de mobilisation du frottement entre chaque niveau de jauges. La figure 9 présente un exemple de courbe de mobilisation du frottement en fonction du déplacement (ici entre le vérin et une des jauges positionnées au-dessus). Ce type de courbe est tracé

COURBE DÉPLACEMENTS VS CHARGE DE PART ET D'AUTRE DU SYSTÈME O-CELLS



8 © FLUGRO

pour différents tronçons de barrette entre différentes jauges de déformation, au-dessus et en dessous des vérins. L'évaluation de ces courbes et le calage avec des modèles de sol selon la méthode Frank & Zhao (Bull. liaison Labo. P. et Ch., 119, mai-juin 1982) nous ont permis d'évaluer les frottements limites de la craie, légèrement supérieurs à ceux proposés par la Norme NF P 94-262.

PRISE EN COMPTE DES RÉSULTATS DANS LE DIMENSIONNEMENT

Au marché, la profondeur des barrettes était donnée considérant qu'un essai pourrait être mené et que les limitations de la norme NF P 94-262, dans le cas de l'absence d'essai pourraient

8- Courbe déplacements vs charge de part et d'autre du système O-Cells.

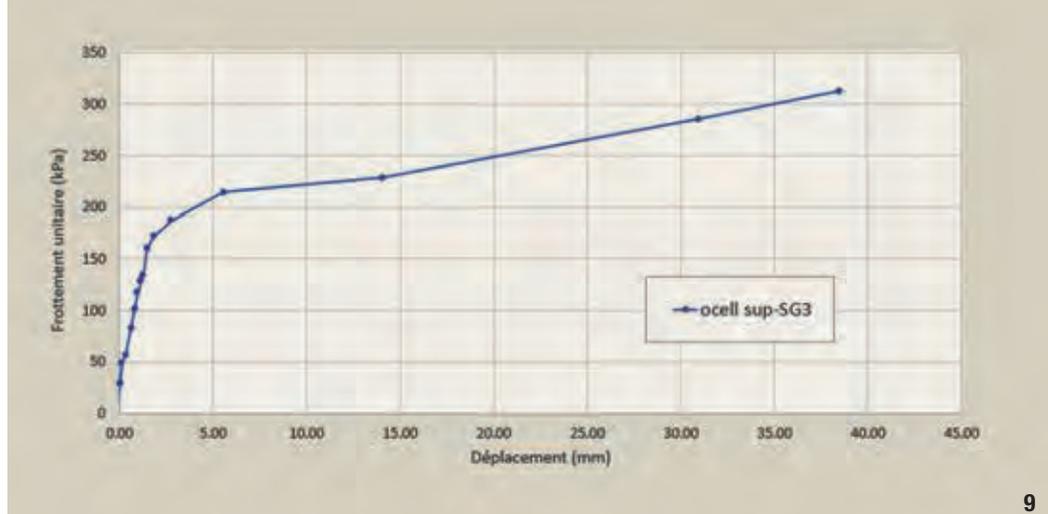
9- Courbe Frottement - Déplacement.

8- Displacement vs load curve on either side of the O-Cells system.
9- Friction-displacement curve.

être dépassées. Le bon déroulement de l'essai à l'aide du système O-Cells a permis de confirmer ces dispositions et même d'aller au-delà : les valeurs de frottement étant bonnes, il a été possible d'envisager la suppression des micropieux, en contrepartie de l'ajout de 12 barrettes.

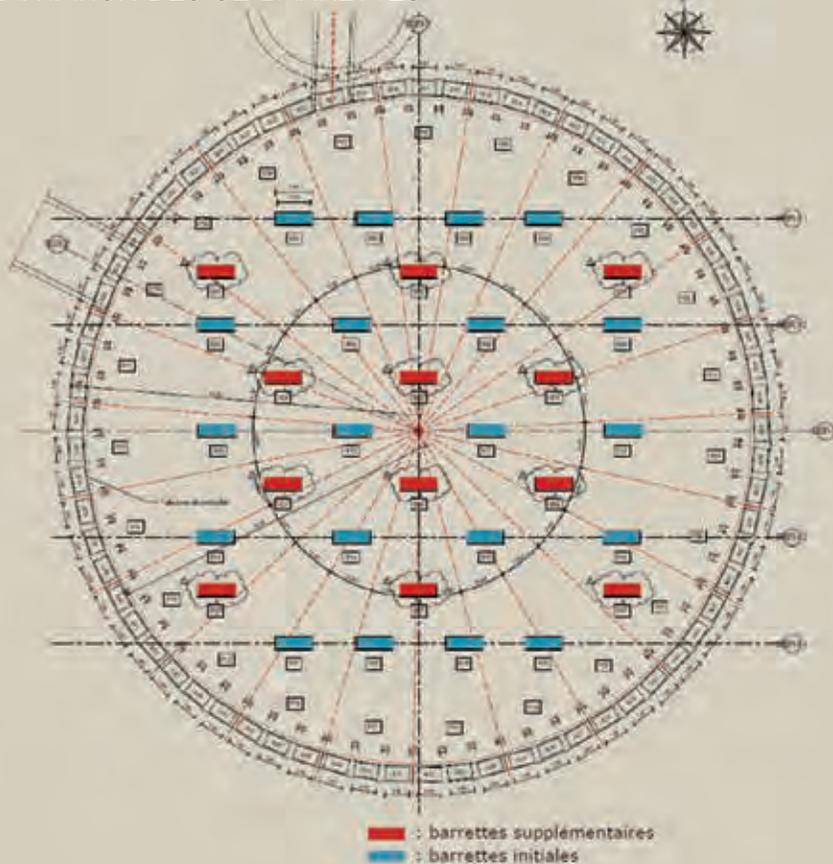
Ainsi, il a été finalement retenu de réaliser douze nouvelles barrettes, arasées sous le radier, afin de ne pas interférer avec la structure interne du bassin. Celles-ci sont rajoutées en fonction des sollicitations maximales dans le radier. Leur implantation s'inscrit de manière homogène parmi les 20 barrettes initiales du projet, avec notamment un renforcement du noyau central (figure 10). L'épaisseur du radier est légèrement épaissie à 1,50 m.

COURBE FROTTEMENT - DÉPLACEMENT



9 © FLUGRO

IMPLANTATION DES 32 BARRETTES



■ : barrettes supplémentaires
■ : barrettes initiales

10- Implantation
des 32 barrettes.

10- Layout of
the 32 barrettes.

CONCLUSIONS

Ce chantier offre un bon exemple d'optimisation d'ouvrage de fondations grâce à la réalisation d'essais géotechniques in situ. Pour la première fois en France, le système O-Cells a été mis en œuvre dans une barrette de fondation, afin de mener à bien un essai de chargement et de caractériser le frottement barrette/craie à une soixantaine de mètres de profondeur.

En outre, au-delà de l'optimisation des barrettes, le bon déroulement de l'essai a également permis de revoir le mode de fondation en supprimant les micropieux initialement prévus et en ne retenant qu'un système homogène de fondations composé de 32 barrettes travaillant en traction pour la reprise des sous-pressions de l'ouvrage. Le dimensionnement n'est plus conditionné par l'appréciation délicate des raideurs relatives entre barrettes et micropieux. L'homogénéisation du mode de fondations permet une meilleure appréciation des descentes de charges et des sollicitations dans le radier. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- Bassin de stockage de 46 000 m³
- 50 m de diamètre
- Fond de fouille à 34 m de profondeur
- 23 panneaux de paroi moulée à 62 m de profondeur
- 32 barrettes de 2,80 m x 1,00 m descendues à 81 m de profondeur
- Radier d'épaisseur 1,50 m
- 1 essai de chargement à 26 MN sur barrette (système O-Cells, Fugro sous-traitant)

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Ville de Paris, Direction de la Propreté et de l'Eau
MAÎTRE D'ŒUVRE : Prolog Ingenierie (mandataire) et Artelia
ASSISTANT GÉOTECHNIQUE MAÎTRE D'ŒUVRE : Icaruss ingénieurs Conseils
MISSION DE SUPERVISION GÉOTECHNIQUE D'EXÉCUTION : Setec Terrasol
TITULAIRE DU MARCHÉ : Groupement Impluvium : Urbaine de Travaux (Mandataire), Sade, Bessac, Soletanche Bachy France et Sefi-Intrafor
CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Btp Consultants

ABSTRACT

PARIS XIII^e - AUSTERLITZ BASIN - LOADING TEST ON BARRETTE

TONY PEREIRA CORREIA, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MAXIME FONTY, SOLETANCHE BACHY FRANCE - SABIKA GHEGEDIBAN, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MICHEL MARON, SPÉCIALISTE DES ESSAIS DE PIEUX, FUGRO - BAO-ANH NGUYEN, SEFI INTRAFOR

To construct the Austerlitz storage basin, 50 metres in diameter, with a foundation raft located 34 metres below the natural ground, a network of very long foundations had to be put in place, in order to anchor the foundation raft subjected to strong water uplift forces. The Impluvium consortium in charge of the works collaborated with Fugro to conduct a loading test, of the O-Cells type, on a barrette 60 metres deep, to characterise friction with the anchoring ground. Based on this test, the stormwater basin foundation method was changed for a unique foundation method with optimised depths. This type of test, which is very widespread in other countries, was deployed in France for the first time on a barrette. □

PARÍS, DISTRITO XIII - ESTANQUE AUSTERLITZ - ENSAYO DE CARGA SOBRE PILOTE FLOTANTE

TONY PEREIRA CORREIA, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MAXIME FONTY, SOLETANCHE BACHY FRANCE - SABIKA GHEGEDIBAN, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MICHEL MARON, SPÉCIALISTE DES ESSAIS DE PIEUX, FUGRO - BAO-ANH NGUYEN, SEFI INTRAFOR

La realización del estanque de almacenamiento Austerlitz, de 50 m de diámetro, con una solera situada a 34 m bajo el terreno natural, precisa la instalación de una red de cimientos de grandes longitudes para anclar la solera, sujeta a fuertes subpresiones de agua. El consorcio Impluvium, responsable de las obras, en colaboración con Fugro, ha llevado a cabo una prueba de carga de tipo O-Cells sobre un pilote flotante de 60 m de profundidad, con objeto de caracterizar las fricciones con el terreno de anclaje. La prueba ha permitido revisar el modo de cimentación del estanque de tormentas en un modo de cimentación único con profundidades optimizadas. Este tipo de prueba, muy habitual en otros países, se ha realizado por primera vez en Francia sobre un pilote flotante. □