

## OA P13, un puits de lancement de tunnelier au cœur du site protégé de l'Île de Monsieur

*Mohammed Sabbah, Responsable travaux MOE, Ingérop ; Martin Cahn, Ingénieur géotechnicien, GEOS INGENIEURS CONSEILS ; Benjamin Giacometti et Maxime Fonty, Ingénieurs étude, Soletanche Bachy ; Pierre-Benoit Passot, Ingénieur travaux, Soletanche Bachy*

Le tronçon T3A de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express (GPE) franchit deux fois la Seine en amont et en aval de l'Île Seguin. Ce tronçon de 4 km en souterrain entre la gare de Fort d'Issy-Vanves-Clamart (FDV exclue) et l'ouvrage annexe du Puits Île de Monsieur (OA P13) comporte les gares Issy RER (ISS) et Pont de Sèvres (PDS), 4 ouvrages annexes et une passerelle reliant l'Île Seguin à la gare PDS. La proximité de la Seine constitue un atout pour l'approvisionnement et l'évacuation des déblais mais implique des contraintes vis-à-vis des protections aux crues.

L'OA P13 se situe entre la gare Pont de Sèvres et la future gare Saint-Cloud, qui fait partie du tronçon T4 de la ligne 15 Ouest. Cet ouvrage est le point limite entre les marchés du tronçon T3 (ligne 15 Sud à l'est, entre Villejuif Louis-Aragon et Île de Monsieur) et du tronçon T4 (ligne 15 Ouest, entre Île de Monsieur et Stade de France), il sert de point de départ du tunnelier qui réalise le secteur ouest du tronçon T3 jusqu'à la gare de Fort d'Issy – Vanves – Clamart, soit une longueur de tunnel de 4 146 m environ (y compris la traversée des gares Pont de Sèvres et Issy RER).



Figure 1 : l'ouvrage dans son environnement

L'ouvrage est constitué d'un puits en parois moulées, de forme « tri-lobique » constituée de trois parties circulaires sécantes, constituant le corps principal de l'ouvrage annexe. Le puits est axé sur le

tunnel. Les dimensions en plan du puits sont les suivantes : longueur de 50 m entre nus de parois moulées (y compris la tolérance de verticalité de la paroi moulée), largeur maximale de 24 m entre nus de parois moulées et correspondant au diamètre des parties circulaires du puits. La largeur minimale du puits est de 18,4 m au niveau des jonctions des parties circulaires du puits.

Le lobe Ouest doit permettre d'intégrer la trémie de dimensions 20 m x 8 m nécessaire à l'approvisionnement des coupons de voies.

Le puits a une profondeur de 29,8 m (différence entre le TN moyen à 30,2 m NGF et le niveau du rail à 0,4 m NGF) ;

<b>Intervenants</b>	
Maître d'Ouvrage	Société du Grand Paris
Assistant à Maîtrise d'Ouvrage	Artemis
Maître d'Œuvre	T3a Ingérop/GEOS– Setec TPI (mandataire du T3)
Coordination SPS	Groupement Presents – Veritas
OCTA	Groupement Veritas – Apave
Groupement d'Entreprise	Horizon (Bouygues TP, Soletanche Bachy France, Bessac, Soletanche Bachy Tunnel)

## Contexte géologique

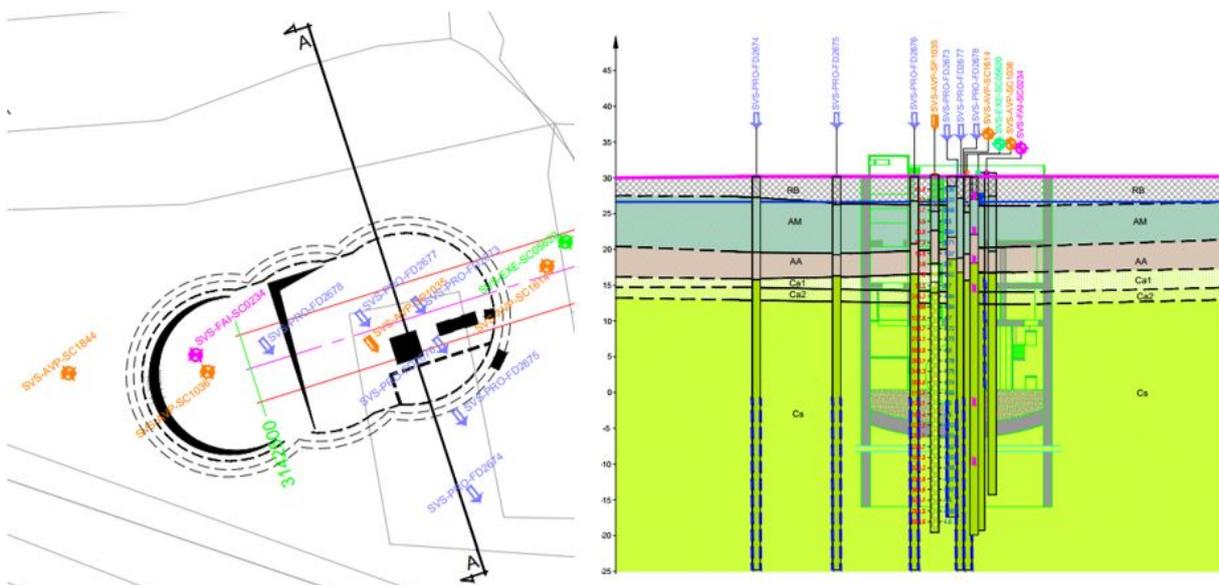
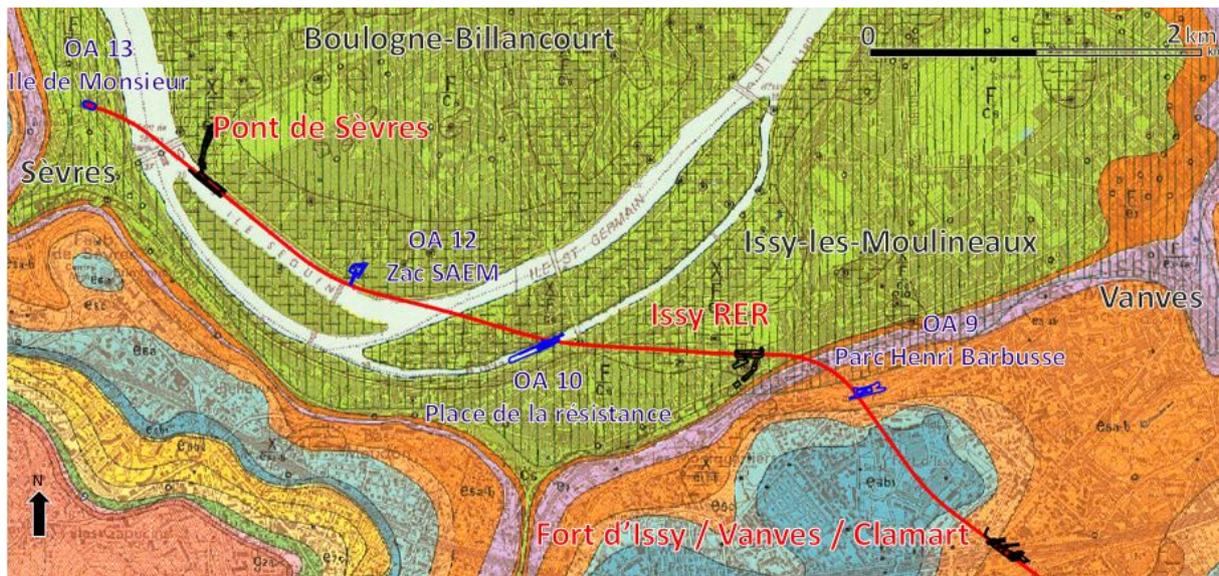
L'Ouvrage Annexe 13 de l'Île de Monsieur (OA P13) est implanté en rive gauche de la Seine sur la commune de Sèvres.

Comme la majorité des autres ouvrages du tronçon T3A de la ligne 15 Sud, le puits et ses parois traversent principalement la Craie Campanienne. Ainsi, après une couverture quaternaire d'environ 14 mètres, constituée de remblais (Rb), d'Alluvions Modernes (AM) et Anciennes (AA), 23 mètres de Craie sont retrouvés jusqu'au fond de fouille.

Comparativement à la rive droite à Boulogne, l'altération de la craie sur l'Île de Monsieur est réduite avec environ 2,5 mètres de Craie pâteuse (Ca1) et 1 mètre de craie fracturée (Ca2). La craie étant un matériau particulièrement difficile à échantillonner, sensible à l'eau, au gel, présentant des caractères thixotropes et une rupture fragile, il s'est révélé quasiment impossible de distinguer visuellement les faciès d'altérations via les descriptions des carottes. Les différents états d'altérations ont été identifiés sur la base d'une analyse des essais in-situ, principalement pressiométriques, faite à l'échelle du tronçon.

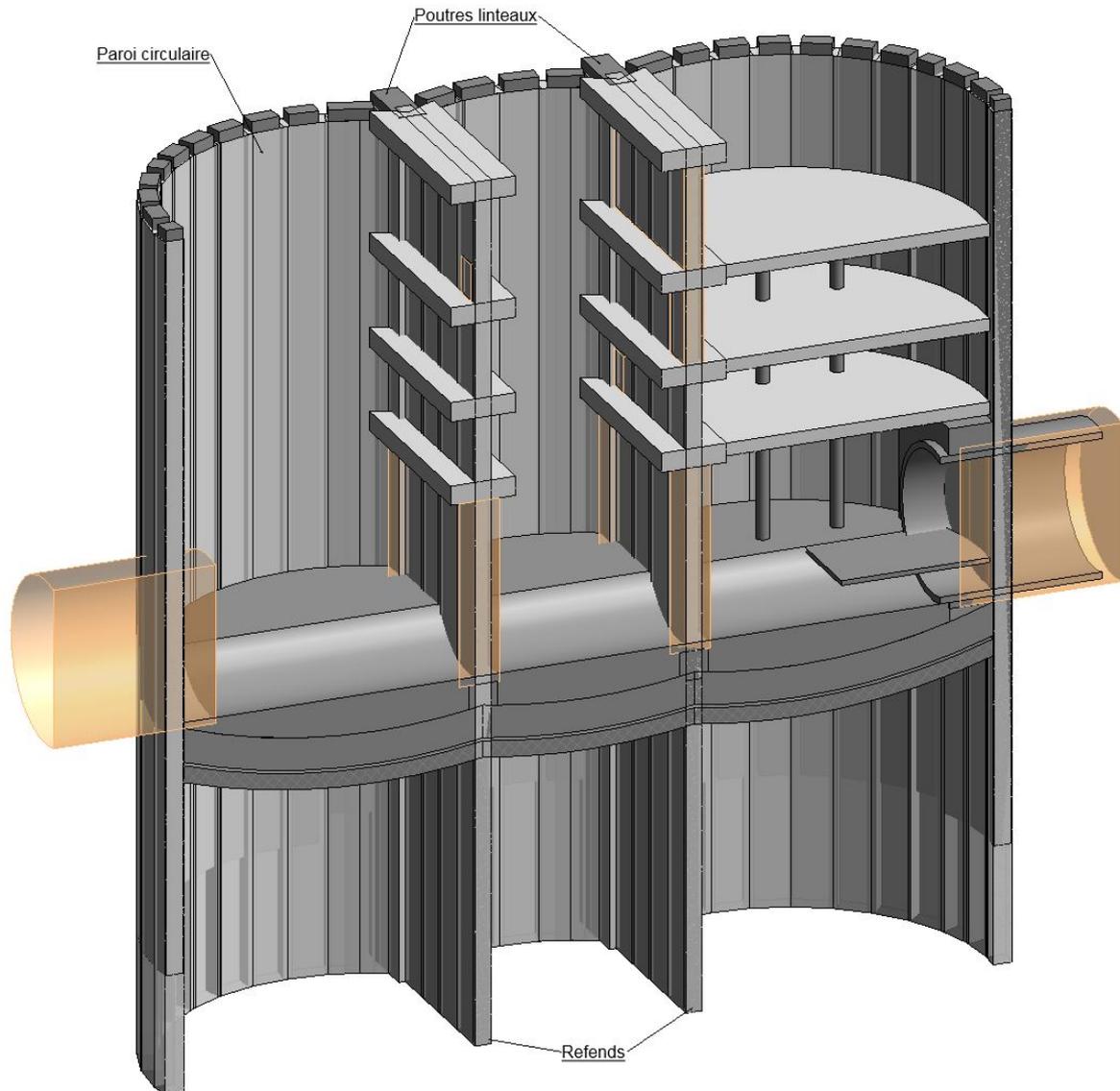
La Craie Saine (Cs) de l'Île de Monsieur, dont la perméabilité, inférieure à  $5.10^{-6}$  m/s a été confirmée tant en phase étude par un essai de pompage que par des essais d'eau en forages réalisés lors de la campagne G3, constitue le bouchon de l'ouvrage limitant les débits d'exhaure et la couche d'ancrage des parois moulées.

Deux nappes sont rencontrées au droit du puits : la nappe alluviale de la Seine et celle de la Craie. Les deux sont en communication par le biais du réseau de fracturation de la craie de sorte qu'un seul niveau piézométrique est retenu à 26,7 NGF pour le niveau courant. La charge hydrostatique atteint ainsi 33 mètres au niveau du fond de fouille.



## Conception

L'ouvrage OA P13, comme les autres ouvrages du lot, a fait l'objet d'une modélisation 3D sous le logiciel REVIT, à partir de laquelle les plans d'exécution de l'ouvrage sont produits (panneautage, élévations, etc.). Cette modélisation offre également un outil d'aide à la définition des méthodes, et notamment celles relatives aux dispositions nécessaires à l'entrée et à l'exploitation du tunnelier.



Lors des études d'exécution des parois moulées, le schéma structurel suivant a été adopté pour la reprise des pressions de terres et d'eau :

- Les parois moulées circulaires des lobes sont auto-stables, uniquement appuyées par le radier ;
- La jonction de deux lobes est traitée comme une poutre chargée par la résultante de la pression cylindrique en provenance des lobes adjacents, appuyée par les refends, les butons centraux et le radier. La démolition du refend central sur la hauteur du tunnel est réalisée en deux temps, de manière à réaliser le radier avant que la portée maximale de la poutre linteau soit atteinte.

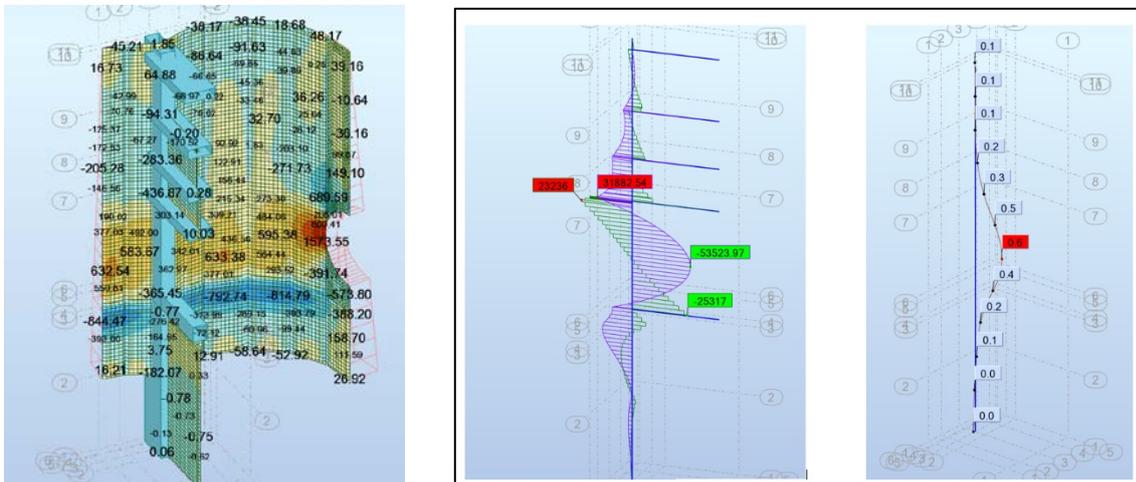
Les parois moulées des lobes ont ainsi pu être dimensionnées à l'aide d'un modèle aux coefficients de réaction, en considérant une rigidité cylindrique égale sur la hauteur de la paroi à  $E \cdot e / R^2$  ( $E$ ,  $e$  et  $R$  étant respectivement le module d'Young du béton de paroi, l'épaisseur de la paroi, le rayon des lobes). La vérification de la compression dans l'anneau de béton a été menée à l'ELS sur la base de l'épaisseur inscrite et à l'ELU en tenant compte des déviations conformément à l'EC2.

La prise en compte des percements des tunneliers du T3A et du T4 est modélisée en annulant la rigidité cylindrique sur la hauteur de l'ouverture, avec toutefois prise en compte d'un effet gousset (annulation progressive de la rigidité, en parties supérieure et inférieure de l'ouverture)

Les poutres en jonction de lobes ont fait l'objet d'un double calcul :

- Modèle aux coefficients de réaction, phasé, à l'aide du logiciel Paris, développé par Soletanche Bachy ;
- Modèle structure aux éléments finis 3D, non phasé, à l'aide du logiciel Robot. Un modèle au coefficient de réaction monophasé a été produit, dans le but de faire une comparaison indépendante du phasage.

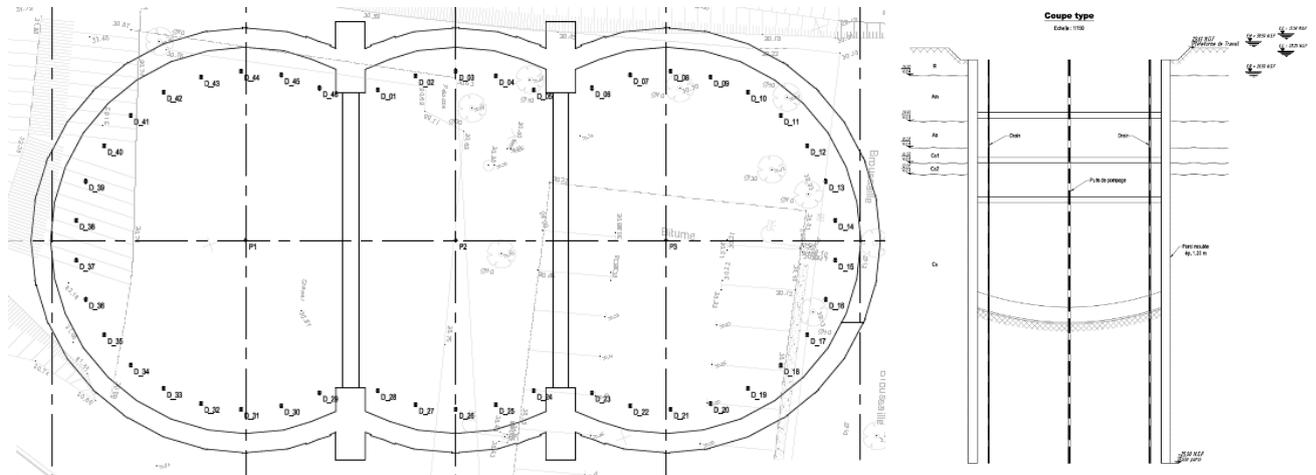
Le modèle structure aux éléments finis a été produit pour appréhender de manière plus fine les redistributions d'efforts dans les butons centraux. Et en effet, si les deux modélisations convergent lorsque l'on additionne les réactions d'appuis, les efforts se répartissent différemment dans les butons : les butons supérieurs sont plus chargés dans le modèle aux éléments finis (+70%) tandis que le buton immédiatement au-dessus de l'ouverture faite dans le refend est plus chargé dans le modèle aux coefficients de réaction. De plus, le modèle aux éléments finis montre des moments de flexion et efforts tranchants moindres (de l'ordre de 20%) que sur le traitement réalisé aux coefficients de réaction : Le modèle 3D permet une redistribution du chargement en amont de la poutre linteau et lisse le chargement sur la poutre linteau, conduisant à une répartition d'effort pouvant être dimensionnante pour les butons supérieurs. L'enveloppe des deux modèles a été retenue in fine pour le dimensionnement des structures.



Le radier, en forme de coupole inversée, est résistant aux sous pressions. Il les transmet aux parois moulées périphériques et aux fiches des parois moulées transversales. La capacité résistante de la paroi moulée tient compte à l'ELS QP d'un abattement conforme à la NF P EN 94-262 dans la mesure où aucun essai de portance n'est réalisé sur la paroi moulée ( $F_{t,d} < 0.15 R_s$ ). Cet abattement conduit pour la justification des fiches de parois moulées transversales, à suspendre l'effort de traction résultant jusqu'à leur base pour transmettre les efforts aux poutres linteaux par un schéma en bielle-tirant.

Pour les phases provisoires, la mise hors d'eau est assurée à l'aide d'un réseau de drains passifs descendus jusqu'à la base de la paroi de manière à écrêter les pressions sous le niveau du fond de fouille au fur et à mesure des terrassements. Ce système de drains passifs a été retenu en conception et en exécution, pour tenir compte de la faible perméabilité de la craie saine et des rayons d'action de

puits de captage insuffisants. Le puits d'essai de Boulogne (Puits OA P12, diamètre 9,8m) avait montré que seule la réalisation de drains passifs à proximité de la paroi permettait de faire chuter la pression au niveau du pied de paroi sous laquelle 3 cellules de pressions interstitielles avaient pu être mises en œuvre. L'efficacité du puits central s'était avérée quant à elle insuffisante.



## Réalisation des travaux

Les travaux de parois moulées ont débuté en avril 2018, après défrichage de l'emprise, sécurisation pyrotechnique et mise en place des installations de chantier. Un travail a été réalisé sur l'intégration paysagère du chantier avec notamment la mise en œuvre de palissades bois et la peinture en vert olive de toutes les installations visibles de l'extérieur (centrale à boue, cantonnements, convoyeurs du tunnel).



Figure 2 : Travaux de parois moulées

L'excavation a été menée avec deux ateliers équipés de bennes hydrauliques instrumentées « KS ». Trois épaisseurs de bennes ont été mobilisées : 1,20 m pour la paroi périmétrale, 1,00 m pour les refends transversaux et 1,80 m pour les quatre panneaux de jonction.

L'excavation conduite à 55 m de profondeur a nécessité une maîtrise de la verticalité relativement fine pour un ouvrage foré à la benne. En effet, les bandes d'arrêt d'eau entre panneaux étant nécessaires sur toute la hauteur de la paroi compte-tenu de la charge hydraulique importante, il a fallu descendre les coffrages portes-joint jusqu'à la base de l'excavation. Pour rendre possible le décoffrage de ces joints à grande profondeur, à la benne, la maîtrise des déviations a été particulièrement soignée (0.12 % en moyenne sur l'ouvrage ce qui représente 7 cm à 55 m). Sur la partie circulaire de l'ouvrage, les joints ont été positionnés avec un renvoi d'angles en cales polystyrène, spitées à l'arrière du coffrage. Ils ont été guidés durant toute leur mise en place à l'aide d'un châssis construit sur mesure, pour garantir le bon positionnement sur toute leur hauteur. Ces dispositions particulières ont permis le bon décoffrage de tous les joints, sans dommage.

Un autre point particulier concerne l'excavation des panneaux de jonction entre lobes. Ces panneaux hybrides se composent d'une paroi linteau de 4,30 m de longueur et 1,80 m d'épaisseur et des deux amorces des parois de lobes en épaisseur 1,20 m. Leur perforation a donc nécessité le recours à plusieurs dimensions d'outils.

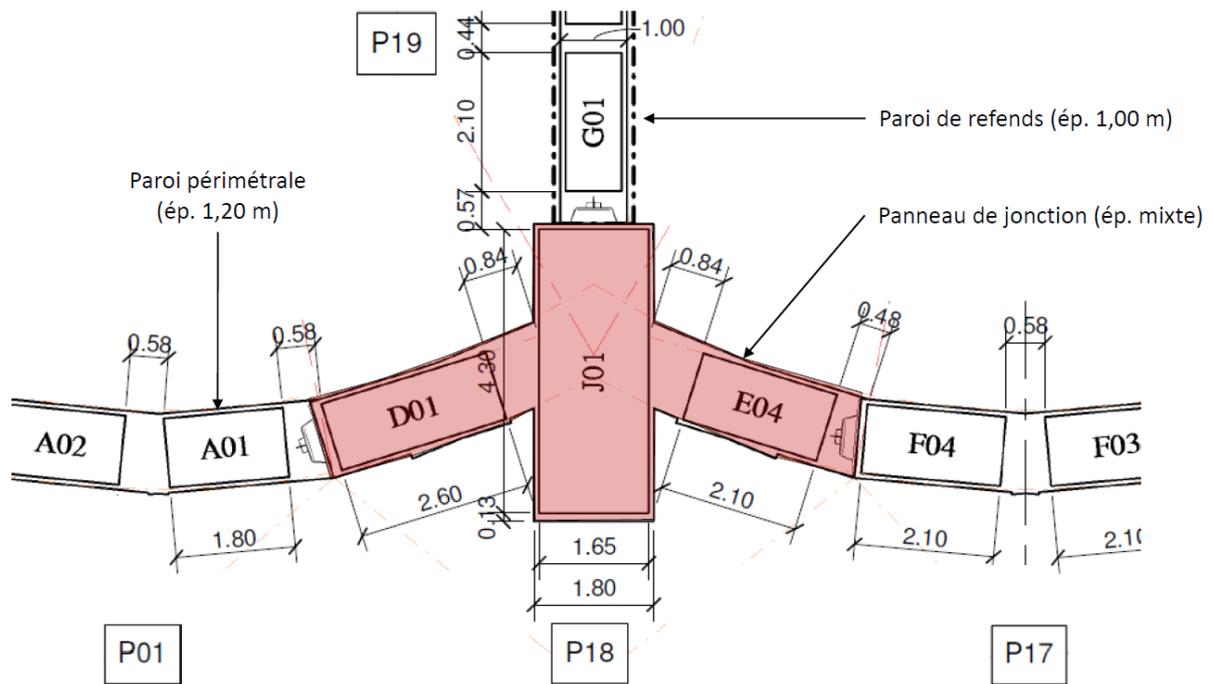


Figure 3 : Vue de détail des panneaux de jonction

La cage d'armature centrale du panneau de jonction, qui concentre les efforts, est significativement plus ferrillée que ses voisines (de l'ordre de  $190 \text{ kg/m}^3$ ). Découpée en 3 éléments préfabriqués en ateliers et livrés par convois exceptionnels, elle a été assemblée sur site et représente un poids total de 80 t. La manutention de ces cages constitue, avec l'extraction des joints, les cas de charges dimensionnant de la grue de manutention de 350 t mobilisée sur chantier. Le bétonnage de ces panneaux représente plus de  $1\,100 \text{ m}^3$ . Il s'est déroulé de nuit, à l'aide de 4 tubes plongeurs, pour une meilleure maîtrise des cadences et garantir une remontée rapide du béton.

Une autre contrainte résidait dans le faible espace disponible sur l'emprise, au regard de l'intensité des flux de circulation. L'entrée de chantier étant située sur la RD7 soumise à une forte circulation, il convenait de maîtriser l'entrée-sortie des camions pour ne pas la perturber. Pour ce faire, le chantier s'est organisé en trois postes avec approvisionnement des cages d'armatures et évacuation des déblais de nuit.

A la suite des travaux de parois moulées, 46 drains de décharges ont été forés à 55 m, en méthode Hi'Drill, sur le pourtour de l'ouvrage. Ils ont été gravillonnés à l'abri du tubage et équipés de tubes piézométriques pour certains. Le dispositif hydraulique est complété par 3 puits (un dans chaque lobe) en diamètre 350 mm, équipés de pompes immergées. L'eau d'exhaure ainsi pompée est traitée dans une station dédiée (séparée des eaux de pluies et des eaux de process) avant rejet à la Seine.

Le terrassement a ensuite été entrepris en limitant la dissymétrie entre les lobes. Les terrains pour parties pollués ont fait l'objet d'un maillage et d'une pré caractérisation par carottage afin de flécher l'évacuation des terres vers les exutoires adaptés. Une partie du génie civil de l'ouvrage est réalisée à la descente. Il s'agit de poutres-butons renforçant les parois refends et de certains niveaux de planchers. Les travaux comprennent également la découpe d'une partie des refends pour permettre l'assemblage du tunnelier et la réalisation du radier en coupelles.

L'ouvrage supporte également le pont roulant qui permettra l'acheminement des voussoirs en fond de puits. Les déblais du tunnelier à pression de terre seront quant à eux évacués à l'aide d'un convoyeur vertical, puis d'un convoyeur secondaire qui enjambe le tramway T2 pour permettre le chargement des barges qui seront amarrées en bord de Seine.

## Auscultations

Le puits de l'OA P13, premier ouvrage du lot T3A implanté en milieu à proximité d'ouvrages sensibles (tramway T2 et RD7) a fait l'objet d'une auscultation importante.

Des contrôles renforcés de la qualité et de la continuité du béton ont été mis en œuvre avec un panneau sur six ausculté par transparence sonique.

Bien que peu de flexion des parois soit attendue, le contexte urbain sensible nécessite un suivi précis des déformées et six cages ont été équipées de tubes inclinométriques. Le suivi de la déformée est également complété par des profils de convergence implantés en redondance des profils inclinométriques.

Trois cellules de mesure de pression interstitielle ont été positionnées 50 cm sous la fiche des panneaux n° P01, P08 et P10. Ces mesures vont être utilisées en cours de chantier pour vérifier l'efficacité du dispositif de rabattement et s'assurer de la stabilité du bouchon de craie saine.

Afin d'étudier le déconfinement du terrain lors de la réalisation de la tranchée des parois moulées et le reconfinement éventuel lors du bétonnage, un extensomètre à quatre points de mesure dans un forage de 35 mètres a été implanté à environ 2,5 mètres du nu de l'ouvrage. Il n'a pas mis en évidence de mouvements importants lors du forage des parois moulées et il sera utilisé lors des terrassements pour évaluer les tassements en profondeur.

L'impact du creusement en surface est de plus mesuré à l'aide d'un théodolite automatisé avec des cibles implantées sur la chaussée et plus de 350 prismes installés sur les voies du tramway.

Le puits de l'OA P13 a par ailleurs fait l'objet d'une auscultation particulière avec la mise en œuvre, dans le cadre d'un projet de recherche, de fibres optiques dans les panneaux A17, C06, A19 et B04.

L'objectif de cette instrumentation est d'étudier le comportement de l'intersection entre la paroi du puits et le tunnel au tunnelier. L'auscultation par fibres optiques noyées dans les structures permet une mesure de profils de déformation continus dans différentes directions. De manière à évaluer la diminution de rigidité cylindrique et le report de charges autour du percement, des fibres transversales ont été installées pour permettre la mesure de la déformation orthoradiale. En complément des mesures par inclinomètres, des fibres verticales ont été mises en œuvre pour permettre la mesure de la flexion verticale.

A la date de la rédaction de l'article, les terrassements du puits de l'OA P13 démarrent et les mesures des différents dispositifs d'auscultation n'ont pas encore pu être comparés aux modèles.

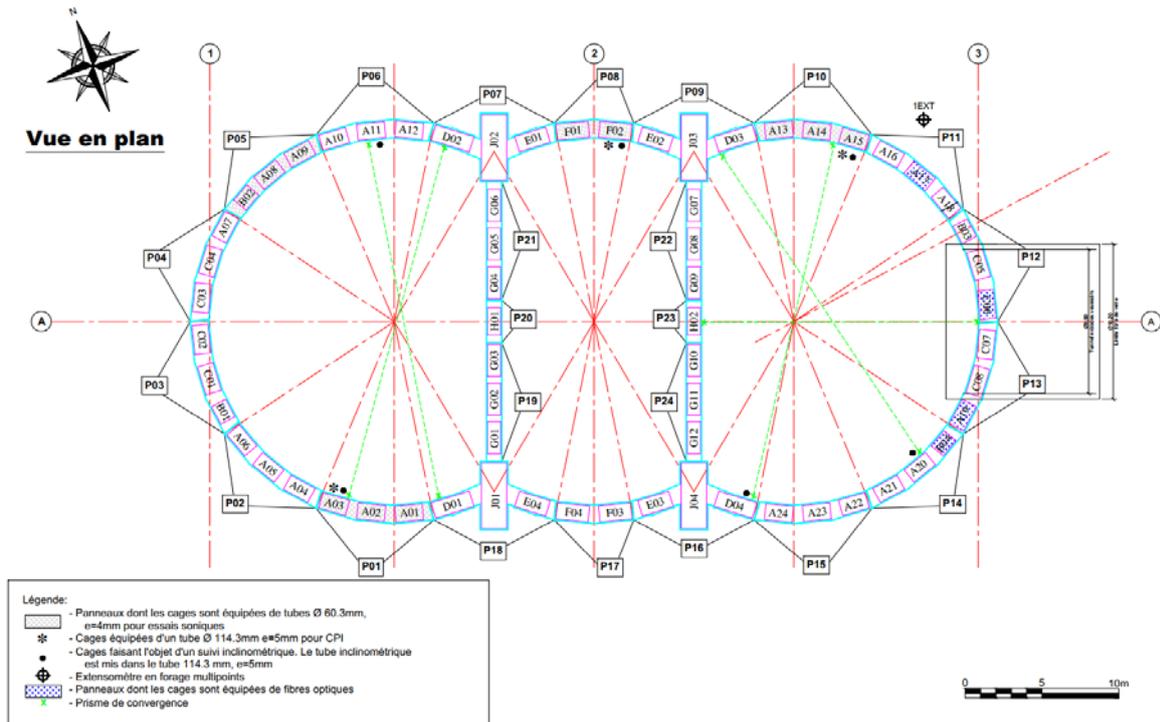


Figure 4 : Plan des auscultations

## Conclusion :

Après environ 6 mois de travail intense, avec notamment l'équipement des panneaux réalisés de nuit, les grues de parois moulées ont cédé la place aux engins de terrassement. Il faudra encore plusieurs mois d'excavation et de génie civil pour que le puits puisse être mis à disposition du tunnelier. Le puits OA P13 de l'île de Monsieur, du fait de sa géométrie, ses dimensions et son contexte est un ouvrage singulier. Cette caractéristique est commune à l'ensemble des ouvrages du tronçon T3A, qui bien que relativement court, présente des enjeux techniques majeurs. L'étroite collaboration entre le groupement d'entreprise, la maîtrise d'œuvre, les AMO et la SGP, qui a déjà fait ses preuves sur ce premier ouvrage, se poursuit sur l'ensemble du T3A.