

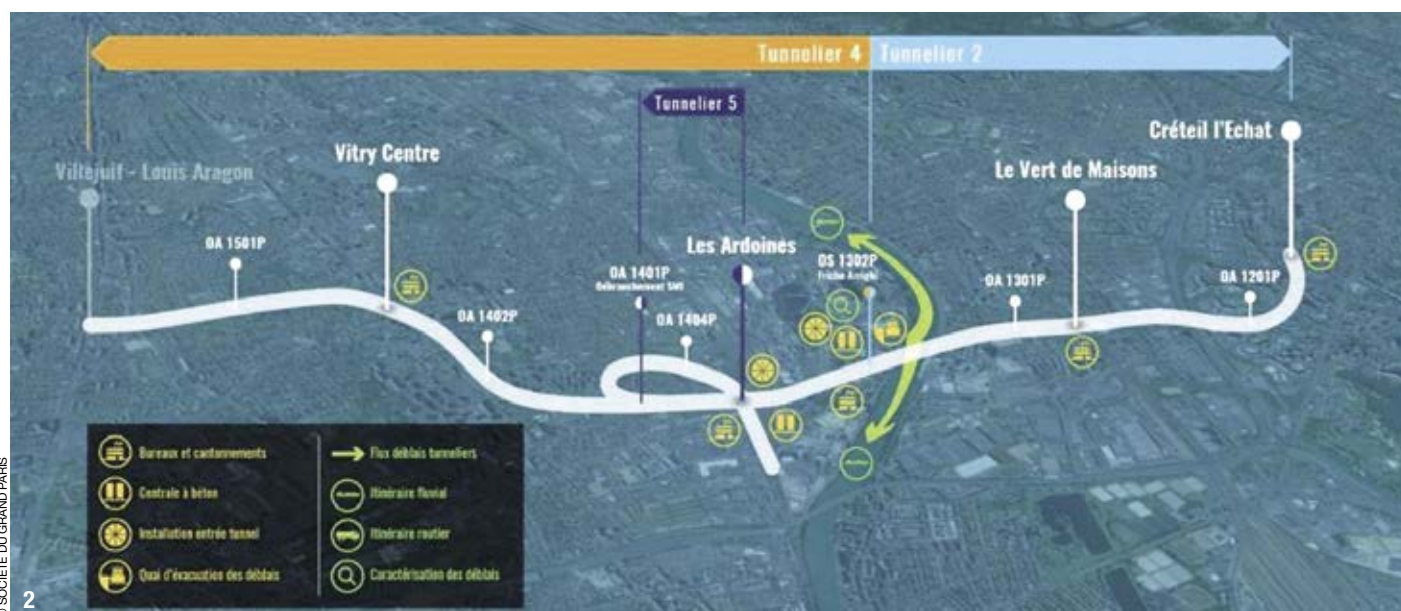


© CEDRIC HEISLY

UNE PAROI MOULÉE DÉFINITIVE EN BÉTON NON ARMÉ SUR LE CHANTIER DE LA LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS

AUTEURS : PAULINE CANTO, INGÉNIEURE D'ÉTUDES, SOLETANCHE BACHY FRANCE - MARION LE BATARD, INGÉNIEURE TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE - PAUL VIDIL, DIRECTEUR ADJOINT DU BUREAU D'ÉTUDES, SOLETANCHE BACHY FRANCE

À L'AUBE D'UNE NOUVELLE ÈRE EN MATIÈRE DE CONSTRUCTION ÉCOLOGIQUE ET MOINS ÉNERGIVORE, LE Puits CIRCULAIRE 1501P DU LOT T2A DE LA LIGNE 15 SUD S'INSCRIT COMME UNE PREMIÈRE RÉFÉRENCE DE PAROI MOULÉE DÉFINITIVE PARTIELLEMENT ARMÉE À TRÈS GRANDE PROFONDEUR. LA SUPPRESSION DE 50 % DES CAGES D'ARMATURE ET DU CONTRE-VOILE DE GÉNIE CIVIL INTÉRIEUR EST POSSIBLE GRÂCE À LA FORME CIRCULAIRE DE L'OUVRAGE (SOUTÈNEMENT AUTOSTABLE), À UN CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE FAVORABLE ET À UNE BONNE MAÎTRISE DES DÉVIATIONS DES OUTILS DE FORAGE.



PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Projet d'infrastructure et de transport majeur pour la région Île-de-France, le Grand Paris Express prévoit la mise en service de 200 km de nouvelles lignes de métro automatiques (dont 180 km en souterrain), avec comme ambitions principales : désengorger le réseau RER existant, favoriser les échanges socio-économiques avec les communes périphériques, réduire le trafic automobile et limiter la pollution atmosphérique. Pour répondre à ces objectifs, il est prévu la construction de 68 nouvelles stations et de nom-

1- Panneau de paroi moulée en cours de forage à la benne hydraulique KS.

2- Vue générale du lot T2A de la ligne 15 Sud.

1- Diaphragm wall panel during KS hydraulic bucket drilling.

2- General view of work section T2A on Line 15 South.

breuses interconnexions avec le réseau existant.

Le lot T2A de la ligne 15 Sud, attribué par la Société du Grand Paris (SGP) au groupement d'entreprises Bouygues Travaux Publics/Soletanche Bachy France/Soletanche Bachy Tunnels/Bessac/Sade réunis sous la bannière commune "Horizon", comporte (figure 2) :

- 6,6 km de tunnel au tunnelier ;
- 4 gares : Créteil-l'Échat, Le-Vert-de-Maisons, Les-Ardoines et Vitry-Centre ;
- 1 ouvrage de débranchement pour les tunneliers : 1401P ;

→ 1 raccordement entre l'ouvrage de débranchement 1401P et le futur site de maintenance des infrastructures composé d'un tunnel, d'une tranchée couverte et d'une tranchée ouverte ;

→ 5 ouvrages annexes d'interstations 1201P, 1301P, 1402P, 1404P, 1501P ;

→ 1 puits d'entrée des deux tunneliers : ouvrage spécial 1302P.

L'Ouvrage Annexe (OA) 1501P, localisé dans la commune de Vitry-sur-Seine, est un puits de secours et de ventilation/désenfumage raccordé par 2 rameaux à la future ligne de métro. ▷


3

© CÉDRIC HELSLY

Son enceinte périphérique de forme circulaire, avec un diamètre intérieur de 19 m, est constituée d'une paroi moulée de 1,20 m d'épaisseur descendue à 65 m de profondeur.

L'excavation de la paroi moulée a été menée dans un environnement restreint inférieur à 1 000 m², contraignant les équipes travaux à installer la centrale de fabrication à boue 360 m en aval du site (figures 3 et 4). L'ouvrage, qui comporte 14 panneaux (7 primaires et 7 secondaires unitaires) a été foré par joints remordus en remplacement des joints CWS prévus en conception (figure 5). Cette solution a permis de limiter la co-activité sur chantier (suppression d'une grue de manutention pour le levage des coffrages) et de s'affranchir des risques de mise en œuvre de joints de 65 m dans une emprise exiguë. C'est également dans cet esprit qu'a été étudiée de manière approfondie la mise en place d'armatures uniquement dans les panneaux de paroi moulée pour lesquels cela était strictement nécessaire.

Un rameau d'accès de secours ainsi qu'un rameau de ventilation/décompression seront raccordés à l'OA 1501P à 45 m de profondeur (figure 6). Afin de faciliter le percement de la paroi moulée lors de l'excavation en traditionnel des 2 rameaux, les cages d'armature ont été équipées de barres en fibre de verre sur la hauteur de chaque ouverture (les portions de paroi situées au-dessus et en-dessous de l'ouverture étant classiquement armées).

CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE ET PROCESSUS D'EXCAVATION

L'OA 1501P traverse les horizons du plateau de Villejuif avec, en partant du terrain naturel à 97 NGF (figure 7) : remblais sur 6 m d'épaisseur, Calcaire de Brie sur 6 m, Argiles Vertes sur 7,5 m, Marnes de Pantin sur 5,5 m, Marnes d'Argenteuil sur 10 m, Masses et Marnes du Gypse sur 32 m, Marnes Infragypseuses sur 1 m, et Calcaire de Saint-Ouen sur 22 m, couche dans laquelle est ancrée de 1,5 m la paroi moulée (base à 31,5 NGF).

3- Vue générale de la centrale située à 360 m en aval du site.

4- Réalisation des parois moulées de l'OA 1501P.

3- General view of the plant located 360m downstream of the site.

4- Execution of diaphragm walls for the 1501P structure.

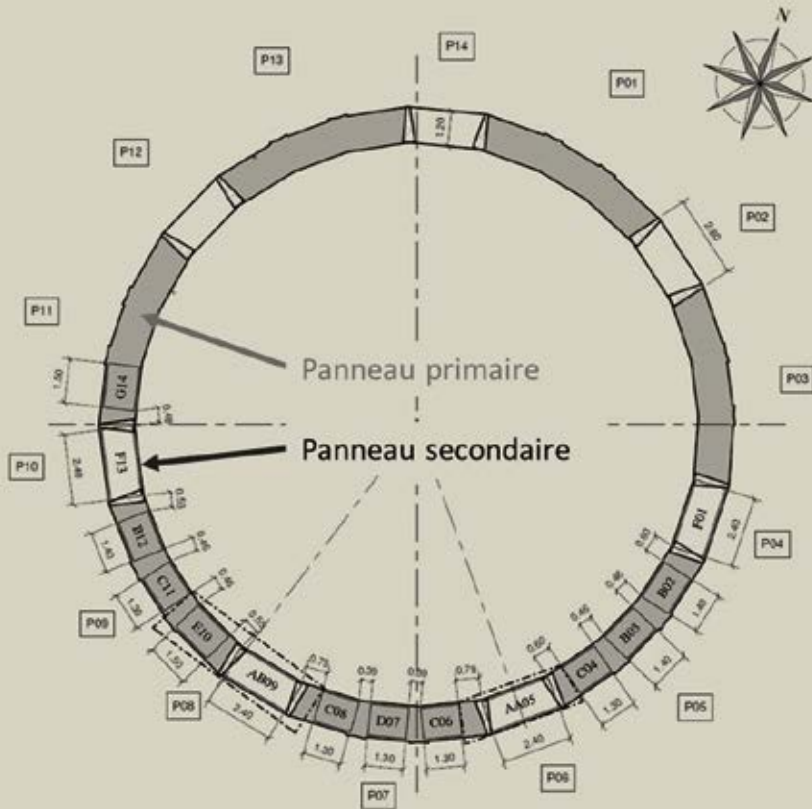
En raison de cette stratigraphie hétérogène, les parois moulées ont fait l'objet d'une excavation mixte. Les panneaux primaires ont été forés à l'aide d'une benne hydraulique KS sur les 31 premiers mètres (figure 1), car plus adaptée aux sols argileux et plastiques et au moyen d'une hydrofraise dans les terrains sous-jacents jusqu'à la base de panneau.

Des pieux, de diamètre 1 000 mm, ont ensuite été réalisés sur chaque passe de panneau remordu, et remblayés avec des matériaux graveleux. Cela a


4

© CÉDRIC HELSLY

PANNEAUTAGE DE L'OA 1501P AVEC JOINTS REMORDUS



5- Panneautage de l'OA 1501P avec joints remordus.

6- Vue en plan et coupe transversale au droit des rameaux.

5- Panelling for the 1501P structure with overlap joints.

6- Plan view and cross section at the connecting gallery level.

permis à l'hydrofraise, lors de l'excavation des panneaux secondaires, de nettoyer ses tambours dans un matériau plus résistant, et d'atténuer les effets de la pollution de la boue de perforation par les argiles.

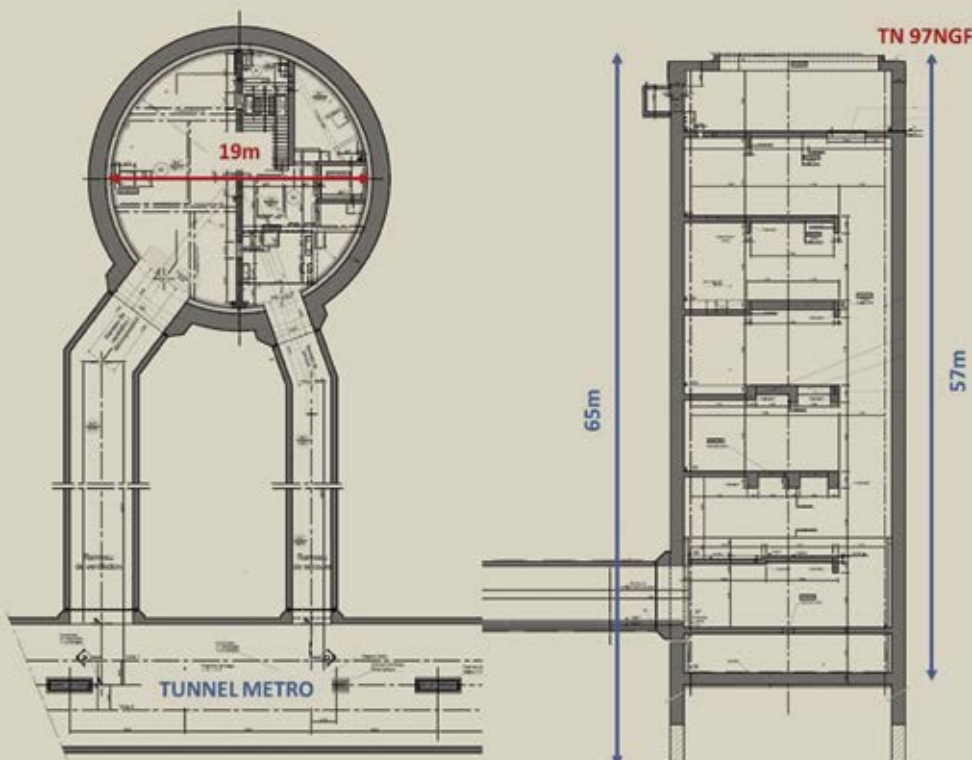
Les aquifères rencontrés au droit du site sont :

- Nappe du Calcaire de Brie vers 90 NGF ;
- Nappe des Marnes de Pantin vers 80 NGF ;
- Nappe des Masses et Marnes du Gypse à 60 NGF environ.

Compte tenu de la variabilité des niveaux de nappe et de la présence de strates peu perméables, le profil de pression d'eau pris en compte pour l'étude de la stabilité horizontale de la paroi moulée présente un faciès particulier. Les poussées d'eau sont relativement faibles à l'échelle d'un ouvrage de 65 m de profondeur, ce qui a pour effet de limiter la flexion verticale des parois moulées et de ne pas solliciter la fiche des parois en traction.

Le radier de l'ouvrage est situé dans la formation des Masses et Marnes du Gypse et n'est baigné par aucune nappe grâce aux Marnes Infragypseuses qui constituent un bouchon naturel étanche. La nappe du Calcaire de Saint-Ouen sous-jacente étant située sous le fond de fouille à 35 NGF (hypothèse vérifiée à l'aide d'un piézomètre sélectif dans la nappe du Calcaire de Saint-Ouen), le radier n'est soumis à aucune sous-pression en phase définitive, et le fond de fouille est parfaitement stable en phases travaux provisoires. Le radier a toutefois été dimensionné pour résister aux sous-pressions de manière conservatrice. Préalablement à l'excavation des parois moulées, 28 forages de prétraitement ont été réalisés sur tout le linéaire de l'ouvrage jusqu'à 69 m de profondeur en méthode Hi'Drill.

VUE EN PLAN ET COUPE TRANSVERSALE AU DROIT DES RAMEAUX



COUPE TRANSVERSALE DE LA STRATIGRAPHIE DU SITE

7- Coupe transversale de la stratigraphie du site.

8- Vues générales de la fouille actuellement en cours de terrassement et de la paroi moulée.

7- Cross section of site stratigraphy.

8- General views of excavation currently in progress and diaphragm wall.

Au total, 426 m³ de terrain ont été injectés pour un total de 1860 m de forage.

Des travaux d'injection d'étanchement ont également été menés au droit des rameaux afin de réduire la perméabilité des terrains encaissants, avec au total 3390 m de forage répartis sur 52 forages.

Les travaux de parois moulées, qui ont duré 4 mois, se sont achevés le 12 janvier 2020, et ont laissé la place aux équipes de terrassement et de génie civil (figure 8).

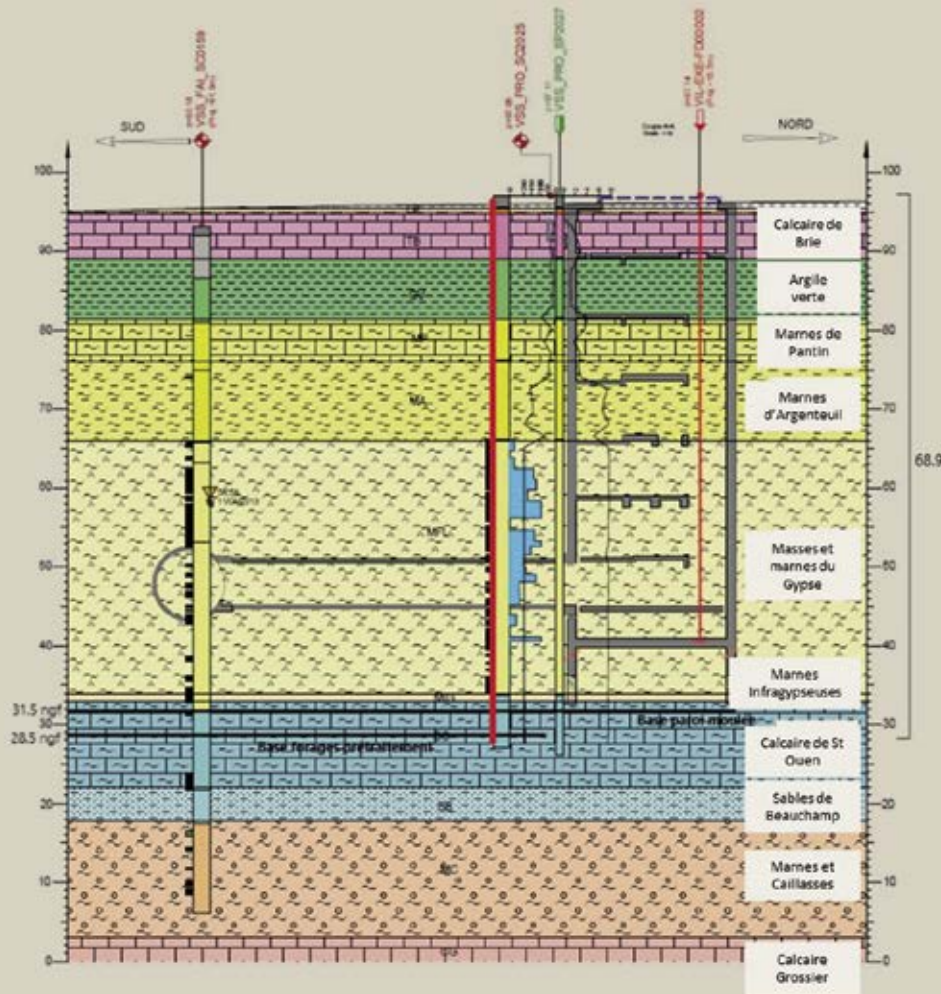
CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT

La paroi moulée circulaire de l'OA 1501P travaille en compression annulaire, rendant ainsi autostable ce soutènement sur les 57 m de hauteur d'excavation des terres.

La stabilité horizontale de l'écran a été étudiée classiquement à l'aide de calculs d'interaction sol-structure 2D aux coefficients de réaction, en assimilant la paroi moulée à un empilement d'anneaux en béton caractérisés par une rigidité cylindrique et au sein desquels se développent des effets voûte.

Le percement de la paroi moulée lors de la création des 2 rameaux empêche le développement des contraintes d'anneau dans l'emprise des ouvertures et induit une redistribution des efforts de part et d'autre de celles-ci, avec pour conséquence (figure 9) :

- Une concentration de contrainte orthoradiale ;
- Une génération de traction verticale dans la zone de diffusion des contraintes : effet linteau ;
- Un assouplissement de la raideur cylindrique des panneaux situés au



7

© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS



8a



8b

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

voisinage des ouvertures, assouplissement d'autant plus important à mesure que l'on se rapproche des ouvertures. Ces panneaux adjacents subissent une génération de moments verticaux additionnels.

Cet assouplissement de la raideur cylindrique, estimé à l'aide d'abaques internes développés par Soletanche Bachy, a conduit à la mise en œuvre de cages plus ou moins ferrillées selon la proximité des ouvertures sur la moitié

de l'ouvrage (7 panneaux armés) avec (figure 10) :

- Des cages linteaux renforcées de part et d'autre des ouvertures (ratio d'acier 60 kg/m³) ;
- Des cages au droit des rameaux,

armées au ferrillage minimum avec un élément mixte acier/fibre de verre sur la hauteur des ouvertures pour faciliter le percement de la paroi moulée (ratio d'acier : 45 kg/m³) ;

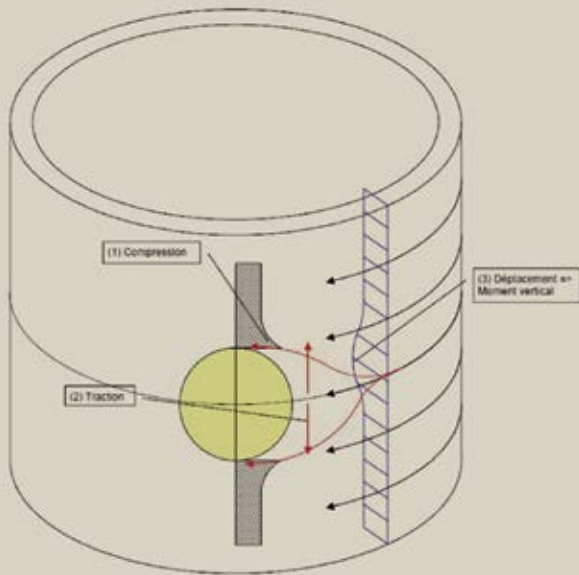
- Des cages faiblement armées au-delà des cages linteaux (ratio d'acier : 50 kg/m³).

Les sollicitations de flexion verticale étant suffisamment faibles et l'impact des ouvertures négligeable sur la seconde moitié du puits, les parois moulées ont été justifiées en béton non armé sur les 7 panneaux restants, conformément à la section 12 de l'Eurocode 2-1-1.

La connexion avec les planchers du génie civil intérieur est assurée par des scellements sur la partie non armée de l'ouvrage, et des coupleurs préalablement disposés dans les cages de paroi sur la partie armée du puits. Les cages d'armature ont également été équipées de tubes de réservation pour les auscultations soniques et inclinométriques de la paroi moulée.

Afin de renforcer localement la rigidité de la paroi moulée, un contre-voile de 40 cm était initialement prévu au marché au niveau des ouvertures des rameaux (figure 11).

SOLLICITATIONS INDUITES par la création d'une ouverture dans une paroi moulée circulaire



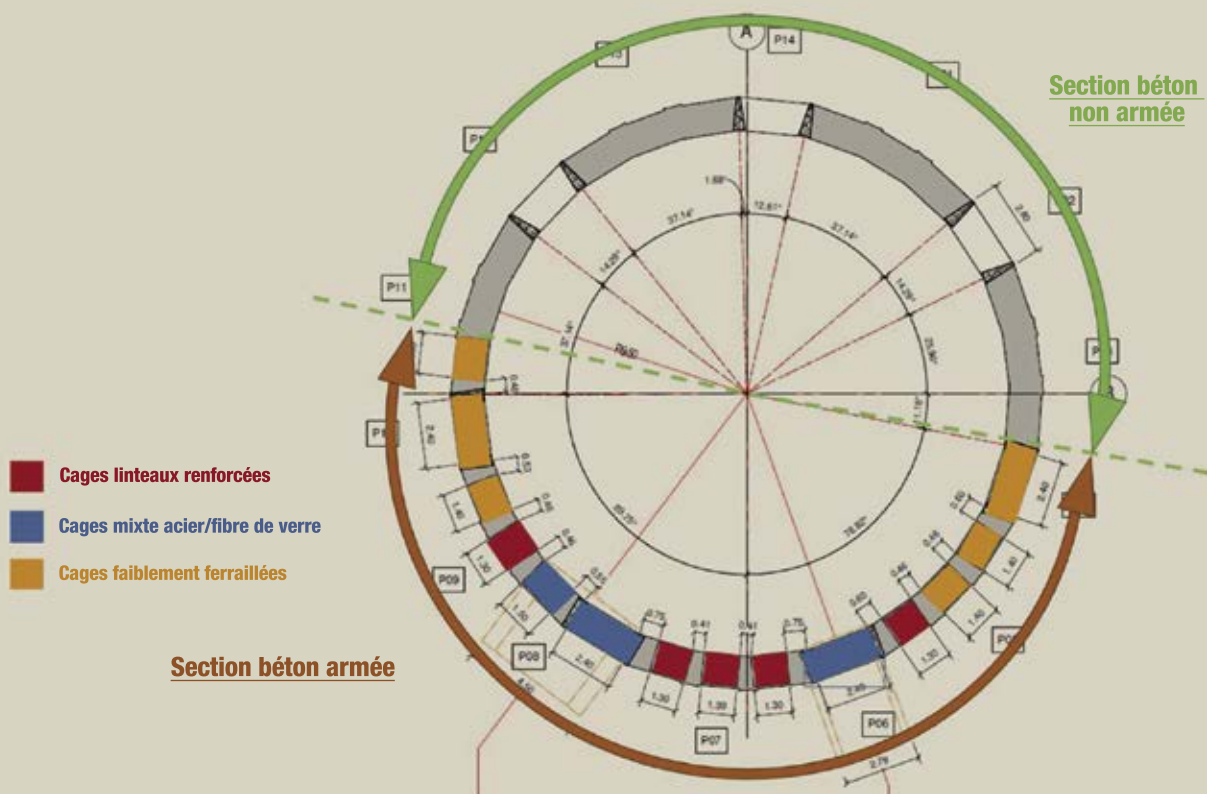
9- Sollicitations induites par la création d'une ouverture dans une paroi moulée circulaire.

10- Répartition des cages d'armature et identification de la partie non armée.

9- Stresses resulting from the creation of an opening in a circular diaphragm wall.

10- Distribution of concrete reinforcing cages and identification of the unreinforced section.

RÉPARTITION DES CAGES D'ARMATURE ET IDENTIFICATION DE LA PARTIE NON ARMÉE



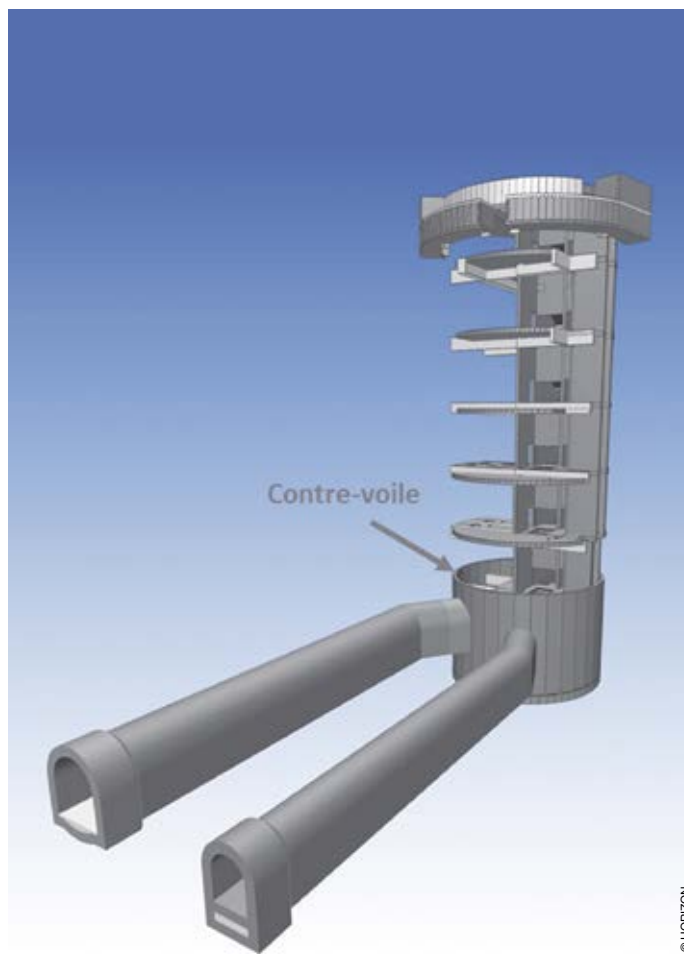
Lors des études d'exécution, l'épaisseur du contre-voile a été intégrée dans les vérifications des contraintes de compression annulaires avec, comme hypothèses, une tolérance de déviation de l'outil de forage de 0,5 %, et un béton de paroi moulée C35/45.

Suite aux travaux de paroi moulée, il a été constaté une nette amélioration des caractéristiques du béton de paroi grâce aux essais de compression sur éprouvettes, ce qui a permis de le surclasser en classe de résistance C45/55. Par ailleurs, la paroi moulée a été forée avec une déviation de 0,15 % bien inférieure au critère contractuel grâce aux mesures de contrôle et de correction en continu des outils de forage, ce qui correspond à une déviation réelle de 7 cm au lieu de 27 cm théorique. La combinaison de ces deux facteurs a permis de justifier les contraintes annulaires de compression dans la paroi moulée sans tenir compte de l'épaisseur du contre-voile, qui a donc pu être supprimé.

CONCLUSION

L'OA 1501P a fait l'objet d'optimisations techniques fortes réalisées dans le respect des normes en vigueur et des spécifications du marché. Ces adaptations ont permis de contribuer à la :

- Réduction du coût de la construction avec une économie de 115 t d'acier dans les parois moulées et la suppression d'un contre-voile (292 m³ de béton armé) pour le génie civil intérieur ;
- Réduction des délais des opérations d'équipement et de bétonnage des parois moulées ;
- Réduction des moyens de levage grâce à la suppression de la moitié des cages d'armature de paroi et à la suppression des joints CWS ;



© HORIZON
11

11- Localisation du contre-voile au droit des rameaux.

11- Location of the retaining wall at the connecting-gallery level.

- Réduction des risques de défauts d'enrobage et donc de reprise du parement sur la partie non armée ;
 - Réduction du transport grâce à la suppression des cages d'armature.
- L'OA 1501P constitue donc une première référence d'ouvrage définitif dont la moitié de l'enceinte en paroi moulée est sans armatures. Cela avait déjà été réalisé pour des ouvrages provisoires (puits de la ligne 14 - passage sous le RER C - puits d'essai de Saint-Maur), mais jamais sur un ouvrage définitif sans contre-voile.

Au-delà de la réduction des quantités et des délais, cette optimisation s'inscrit tout à fait dans la démarche environnementale de Soletanche Bachy de réduction de l'utilisation des ressources en ne mettant en œuvre que ce qui est strictement nécessaire, dans le respect du corpus normatif, grâce notamment à la maîtrise des déviations à forte profondeur et à la qualité des bétons de parois moulées. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

LINÉAIRE DE PAROI : 60 m
PROFONDEUR DE LA PAROI : 65 m
SURFACE : 3 796 m²
BÉTON : 4 556 m³
ACIER : 116 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris (SGP)
MAÎTRE D'ŒUVRE : Systra
ASSISTANT MAÎTRISE D'OUVRAGE : Artemis (groupement Arcadis Esg, Artelia)
CONTRÔLE TECHNIQUE (OCTA) : bureau Veritas / Apave
GROUPEMENT : Horizon Grand Paris (Bouygues Travaux Publics, Soletanche Bachy, Bessac, Soletanche Bachy Tunnels)

ABSTRACT

A PERMANENT DIAPHRAGM WALL IN PLAIN CONCRETE ON THE SITE OF LINE 15 SOUTH OF THE 'GRAND PARIS EXPRESS' PROJECT

PAULINE CANTO, SOLETANCHE BACHY - MARION LE BATARD, SOLETANCHE BACHY - PAUL VIDIL, SOLETANCHE BACHY

Since February 2017, the Horizon consortium has been active on the site of work section T2A for Line 15 South of the 'Grand Paris Express' metro project. Project 1501P is a permanent escape and ventilation shaft consisting of a circular enclosure 1.20m thick and 19m in diameter, executed by the diaphragm wall technique by the Soletanche Bachy teams. This wall, which is the deepest of the five accessory structures of the work section (65 metres deep), is special in that it is not reinforced over 50% of its length. Such technical optimisation is possible thanks to the shaft's circular shape, the weak water thrust and loads applied to the wall, and the absence of groundwater at the bottom of excavation. □

UNA PANTALLA DE HORMIGÓN NO ARMADO DEFINITIVA EN LA OBRA DE LA LÍNEA 15 SUR DEL GRAND PARIS EXPRESS

PAULINE CANTO, SOLETANCHE BACHY - MARION LE BATARD, SOLETANCHE BACHY - PAUL VIDIL, SOLETANCHE BACHY

Desde febrero de 2017, el consorcio de empresas Horizon está movilizado en la obra del lote T2A de la línea 15 Sur del Grand Paris Express. El proyecto 1501P es un pozo definitivo de emergencia y ventilación, formado por un recinto circular de 1,20 m de espesor y 19 m de diámetro, realizado en pantalla de hormigón por los equipos de Soletanche Bachy. Esta pantalla de hormigón, la obra realizada a más profundidad (65 m) de las 5 construcciones anexas del lote, presenta la particularidad de no estar armada en el 50% de su recorrido. Esta optimización técnica ha sido posible gracias a la forma circular del pozo, a un empuje del agua y una cargas aplicadas a la pared débiles, así como a la ausencia de capa en el fondo de excavación. □