

GRAND PARIS EXPRESS LIGNE 15 SUD. PUITS DE RECONNAISSANCE À BOULOGNE BILLANCOURT

AUTEURS : ROBERT PORET, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY - JEAN GEISTODT-KIENER, CHEF DE PROJET, GC INGEROP CONSEIL ET INGÉNIERIE - MARTIN CAHN, INGÉNIEUR GÉOTECHNIEN, GEOS INGÉNIEURS CONSEIL

LA PARTIE OUEST DU TRONÇON T3 DE LA FUTURE LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS S'INSCRIT EN PARTIE DANS LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA VALLÉE DE SEINE : DEUX GARES, QUATRE OUVRAGES ANNEXES ET 3900 M DE TUNNEL Y SERONT CREUSÉS PRINCIPALEMENT DANS LA CRAIE CAMPANIENNE DANS UNE ZONE COMPRISE ENTRE LES COMMUNES DE SAINT CLOUD ET CLAMART. DE FAÇON À RÉDUIRE LES INCERTITUDES GÉOTECHNIQUES LIÉES À LA RÉALISATION DE CES OUVRAGES, UN MARCHÉ DE RECONNAISSANCE A ÉTÉ CONFIE À UN GROUPEMENT D'ENTREPRISES SADE / SOLETANCHE BACHY / SOLETANCHE BACHY TUNNELS. CELUI-CI CONSISTE EN LA RÉALISATION D'UN Puits EN PAROIS MOULÉES, DE TESTS D'AMÉLIORATION DE SOL PAR JET GROUTING, D'UNE GALERIE CREUSÉE SOUS INJECTION ET DE DIFFÉRENTES RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES.



© INGEROP/GEOS

OBJECTIFS DES RECONNAISSANCES

Afin de tester le comportement des terrains en vraie grandeur pour fiabiliser et valider les principes constructifs du tronçon 3 Ouest de la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express, un puits, un rameau et des reconnaissances géotechniques diverses sont réalisés au

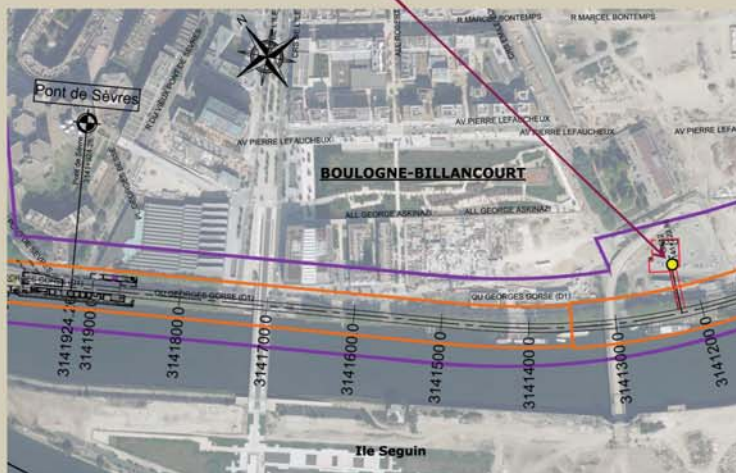
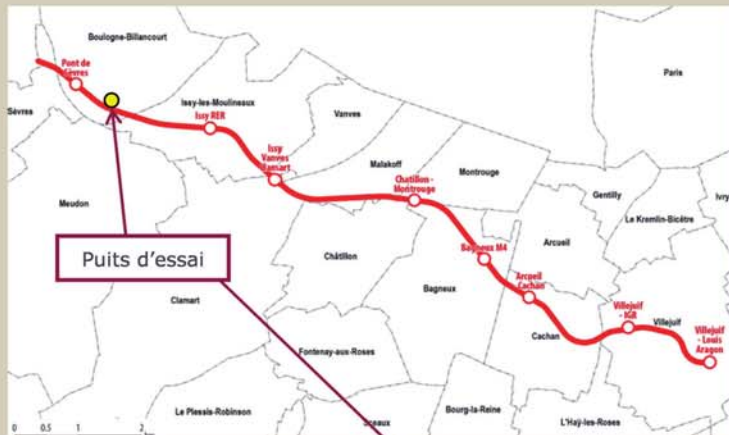
niveau de l'emplacement d'un futur ouvrage annexe dans la ZAC Val de Seine sur la commune de Boulogne-Billancourt, à proximité de la RD1. Les informations attendues à l'issue de l'exécution de ce marché de reconnaissance sont multiples. Il s'agit tout d'abord de conforter les hypothèses de performance des parois

**1- Vue générale
du chantier.**

**1- General view
of the site.**

moulées dans la Craie Campanienne. Les deux méthodes de réalisation - benne hydraulique et Hydrofraise - sont testées et comparées :

- Cadence de réalisation et précision de la verticalité ;
- Résistance mécanique et déformation ;
- Étanchéité.



2- Implantation de l'ouvrage.
3- Contexte géologique.

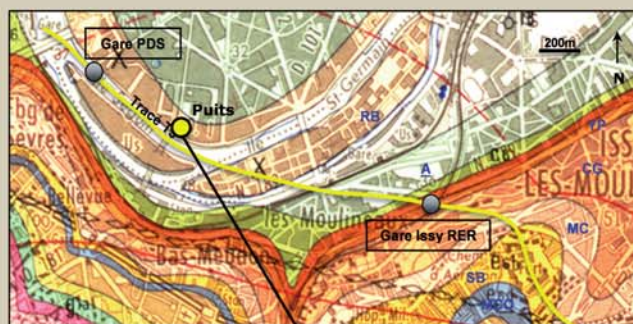
2- Works location.
3- Geological context.

L'amélioration de sol par jet grouting dans la craie est également investiguée. Les différentes méthodes de réalisation sont comparées pour obtenir des informations sur :

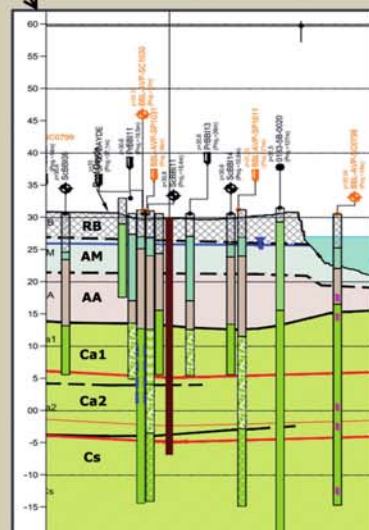
- Le diamètre des colonnes ;
 - La comparaison de la mesure physique du diamètre avec des mesures géophysiques non destructives ;
 - Leur résistance et leur déformation.
- Il s'agit ensuite de tester la réalisation d'un rameau en méthode traditionnelle de dimension réduite. Celui-ci, creusé dans des conditions géotechniques similaires à celles rencontrées par les futurs rameaux de jonction qui relieront le tunnel aux ouvrages de ventilation et de désenfumage, permet :
- De vérifier le besoin de confortement pour l'ouverture dans la paroi ;
 - De tester l'efficacité de l'étanchement et du confortement du terrain par injection ;
 - De vérifier les efforts dans le soutènement ;
 - De mesurer les déformations en surface.

Il s'agit, finalement, de préciser le modèle géotechnique.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE



Légende :
 RB : Remblais
 A : Alluvions
 MCO : Marno-calcaire de S^t Ouen
 SB : Sables de Beauchamp
 MC : Marnes et caillasses
 CG : Calcaire grossier
 YP : Yprésien
 C : Craie
 ◊ ◊ Axe anticlinal de Meudon



CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET INCERTITUDES

Le puits et la galerie de reconnaissance sont implantés en rive droite de la Seine dans la boucle de Boulogne-Billancourt, à proximité du quai Georges Gorse. Le contexte géologique local est marqué par l'affleurement de la Craie Campanienne sous faible couverture alluvionnaire. Cette particularité stratigraphique est liée à l'érosion en vallée de Seine de l'anticlinal de Meudon dont l'axe est proche de celui de la ligne 15. La problématique géotechnique majeure des ouvrages souterrains implantés dans ce contexte est la caractérisation de la Craie Campanienne et de ses différents faciès d'altérations.

La craie a un comportement géomécanique complexe, en raison de la porosité inter et intra-granulaire, qui se traduit par une thixotropie en présence d'eau.



Sur la base des sondages pressiométriques réalisés lors des campagnes G11, G12 et G2, trois faciès d'altérations ont pu être distingués.

- **Ca1** : craie très altérée, pâteuse, marneuse, très fragmentée voire désagrégée ;
- **Ca2** : craie moins molle que Ca1, très fracturée ;
- **Cs** : craie saine compacte avec peu de fractures.

La craie est un terrain difficile à échantillonner et il s'est révélé quasiment impossible d'identifier les trois faciès visuellement à l'échelle des carottes.

Par ailleurs, l'existence de niveaux à silex n'a pu être confirmée ou infirmée dans les sondages, bien qu'avérée dans les retours d'expérience des

travaux réalisés à proximité (figures 2 et 3).

Le projet est implanté à proximité immédiate de la Seine. Deux nappes sont rencontrées au droit du puits : la nappe des alluvions et la nappe de la craie.

Les relevés piézométriques indiquent que les deux nappes sont en communication, vraisemblablement via le réseau de fractures existant dans la craie. Malgré la réalisation préalable d'essais de pompage sur les gares de Pont-de-Sèvres et Issy-RER, la détermination de valeurs de perméabilité des trois faciès de craie reste délicate. De même, le contexte des travaux sous forte charge hydraulique nécessite une connaissance du comportement de la craie vis-à-vis du risque d'érosion interne.

4- Hydrofraise HC05.

5- Vue aérienne du chantier de parois moulées.

6- Excavation des colonnes dans le puits.

7- Réalisation des colonnes de jet grouting.

4- HC05

Hydrofraise.

5- Aerial view of the diaphragm wall project.

6- Excavation of columns in the shaft.

7- Execution of jet grouting columns.

TRAVAUX ET RECONNAISSANCES

DESCRIPTION DES TRAVAUX

Le puits de reconnaissance circulaire comporte un diamètre de 9,4 m utile. Il sera creusé jusqu'à la craie saine. Le dimensionnement de l'ouvrage tient compte de la configuration définitive de l'ouvrage annexe.

Le fond de fouille provisoire (phase reconnaissances) est porté à la cote -7 NGF soit à 38,30 m de profondeur. Le soutènement du puits est assuré par des panneaux de paroi moulée de 49 m de profondeur ancrées dans la Cs. Le puits est constitué de 5 panneaux d'environ 265 m³ dont 3 sont réalisés avec une Hydrofraise HC05 et deux à la benne hydraulique KS (figures 4 et 5).

EXCAVATION DES COLONNES DANS LE PUITS



6



7

© SOLÉTANCHE BACHY / INGÉROP



8- Recording of jet grouting column diameters.

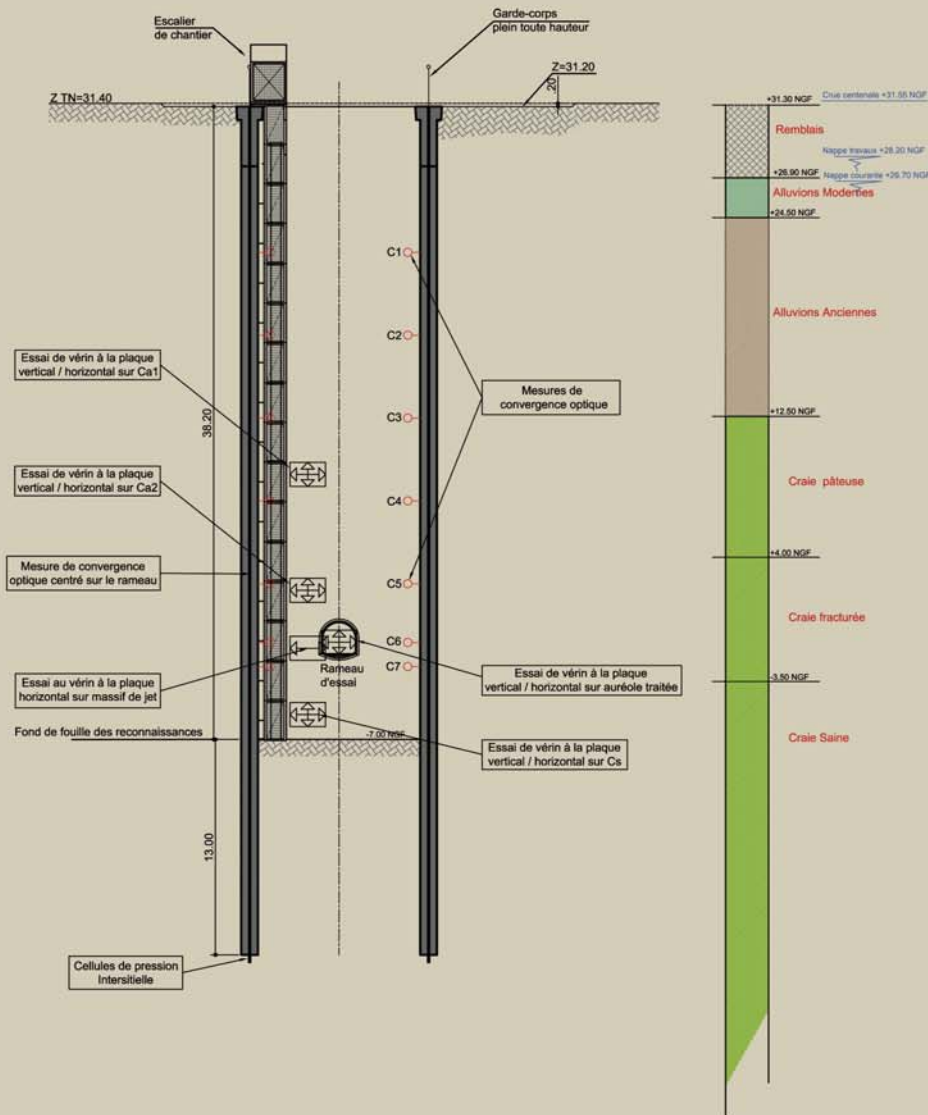
9- Location of jet grouting columns.

Deux méthodes non destructives d'estimation des diamètres de colonnes ont été mises en œuvre : le Cyljet par mesure de résistivité électrique (Soldata) et le Tempjet par mesure de température (Porr).

SOULÉTANCHE BACHY / INGÉROP



CHANTIER D'INJECTION SOUS SAS



Ces estimations ont été confrontées aux relevés en continu des diamètres de colonnes lors de leur mise à nu pendant le terrassement.

Les diamètres moyens des colonnes obtenus dans la craie sont les suivants :

→ **Colonne C1** : 1,25 m pour 0,7 m visé ;

→ **Colonne C2** : 1,65 m pour 1,1 m visé ;

→ **Colonne C3** : 1,25 m pour 0,9 m visé ;

→ **Colonne C4** : 1,40 m pour 0,9 m visé.

Ils ont été relevés sur toute la hauteur des colonnes (figures 8 et 9).

Le massif a, quant à lui, été retrouvé monolithique (figures 6 et 7).

Le rameau d'une longueur de 4 m possède une section d'environ 2,00 x 2,00 m. Il sera réalisé principalement dans l'horizon de Ca2 avec le radier

10- Campagne d'essais.

11- Essai de plaque horizontal sur le massif de jet grouting.

12- Essai de plaque vertical sur la craie.

10- Test campaign.

11- Horizontal plate test on the jet grouting foundation.

12- Vertical plate test on the chalk.

10

© SOLEWANCHE BACHY



11



12

© INGEROP/GEOS



13- Chantier d'injections sous sas.

13- Grouting works through waterlock.

partiellement dans la Cs. Son creusement dans de bonnes conditions de sécurité nécessite la mise en œuvre d'une auréole d'injection de 3 m d'épaisseur à l'aide de 320 m de forage sous sas (figure 10).

TABEAU 1 : PROGRAMME DES RECONNAISSANCES (voir figures 11, 12 et 13)

Catégorie	Information recherchée	Type d'essais
Reconnaissances préalables à la réalisation de l'enceinte en paroi moulée	Perméabilité des différents faciès de craie	Essai de pompage par palier et longue durée avant travaux
	Stratigraphie/ Déformabilité	Forages carotté et sondages pressiométriques
Reconnaissances préalables au terrassement et ultérieur à la réalisation de l'enceinte en paroi moulée. Réalisation de l'enceinte en paroi moulée	Influence de la paroi moulée sur la perméabilité	Essai de pompage par palier et longue durée dans l'enceinte
Reconnaissances mises en place dans les parois moulées	Déformation des parois moulées	Inclinomètres en panneaux
	Gradient hydraulique, dimensionnement de la fiche	Cellules de Pression Interstitielle en pied de fiche
	Bonne mise en œuvre du bétonnage	Tubes soniques en panneaux
Reconnaissances dans le puits	Stratigraphie, fracturation, inclusions de silex	Levé du fond de fouille
	Efficacité du jet grouting dans la craie	Mesure type cylindre électrique, relevé des tailles de colonnes dans le puits
	Déformabilité des parois moulées et interactions	Mesure de convergence, prélèvements de carottes dans la paroi moulée
	Déformabilité du massif	Essais au vérin à la plaque
	Fissuration, Inclusions de silex, déformabilité, résistance, abrasivité à l'échelle de l'échantillon	Prélèvements, essais de laboratoire
	Déformabilité du massif de jet grouting	Prélèvements, essais de laboratoire
		Essais au vérin à la plaque
		Essais au vérin plat
	Perméabilité du massif de Jet grouting	Essais d'infiltration
	Influence du creusement sur la nappe	Suivi du débit de pompage, suivi piézométrique
Reconnaissances dans le rameau	Pollution de l'eau	Mesures in situ des paramètres physico-chimiques des eaux, analyses chimiques
	Déformabilité du massif traité	Mesure de convergence, essais au vérin à la plaque
	Contraintes dans le soutènement	Essais au vérin plat
	Efficacité du traitement d'imperméabilisation	Drains de contrôle, suivi des débits, mesures CPI
	Déformabilité, résistance à l'échelle de l'échantillon traité en injection	Essais de laboratoire sur carotte

RECONNAISSANCES

Le programme des reconnaissances peut être séparé en deux phases, l'une préalable à la réalisation du puits et l'autre en parallèle de l'excavation.

La première phase comprend la réalisation d'un sondage carotté, de deux sondages pressiométriques et d'un essai de pompage. Un second essai de pompage est réalisé après réalisation des parois moulées afin de vérifier l'efficacité de l'enceinte étanche.

La deuxième phase des reconnaissances, réalisée en parallèle de l'excavation, permet de tester le comportement du terrain en vraie grandeur mais également de déterminer les caractéristiques mécaniques et géométriques des parois moulées et du jet grouting. Le programme des reconnaissances peut-être résumé selon le tableau 1. À chaque passe de terrassement (3-4 m environ), les travaux sont arrêtés pour effectuer une série de mesures au fond du puits :

- Levé géologique du fond de fouille ;
- Relevé des cibles de convergences ;
- Mesures inclinométriques ;
- Prélèvement d'échantillons de sol ;
- Prélèvement de carottes dans la paroi moulée et dans les colonnes de jet grouting.

En complément de ces opérations périodiques, des essais au vérin plat et des essais au vérin à la plaque sont effectués dans chaque faciès de craie ainsi que sur le massif de jet grouting et dans le rameau.

CONTRAINTES DU CHANTIER

L'emprise du chantier à l'emplacement des anciennes usines Renault a été bombardée durant les deux guerres mondiales. La présence de bombes non explosées était donc probable. ➤

Pour traiter le risque pyrotechnique, la campagne de reconnaissance préalable a dû être adaptée afin de sécuriser les sondages.

Les terrains au droit des parois moulées ont été préalablement purgés sous assistance d'un pyrotechnicien. Lors du terrassement du puits, la plus forte contrainte a été la coordination entre le creusement et les essais. La priorité a été donnée aux reconnaissances plutôt qu'à la cadence de réali-

sation. Les opérations de terrassement ont été interrompues périodiquement pour permettre la réalisation des essais. Ce phasage a été rendu encore plus complexe dans la couche des alluvions anciennes qui était suspectée de pollution.

Des analyses en laboratoire ont donc été faites à l'avancement du terrassement avant chaque mise en décharge. Aucune pollution n'a finalement été détectée.

Le chantier, à proximité de la Seine, est en zone inondable et des mesures de prévention ont été prises en cas de crue. Les installations de chantiers ont été mises sur pilotis.

Enfin, le chantier est à l'intérieur de la ZAC Rive-de-Seine et doit donc respecter certains règlements imposés par l'aménageur : horaires de chantier de 7 h à 20 h, suivi environnemental, coordination avec les chantiers voisins.

DÉLAIS

Le chantier a démarré les travaux fin octobre 2015. Les parois moulées ont été réalisées entre le 28 octobre 2015 et le 5 janvier 2016, le jet grouting entre le 6 janvier 2016 et le 8 février 2016 ; le terrassement a débuté le 22 février 2016.

Compte tenu de l'avancement actuel des travaux, la terminaison du chantier va se situer vers la fin juillet 2016.

CONCLUSION

Les essais et reconnaissances sont encore en cours, mais les premiers résultats permettent d'ores et déjà de mieux appréhender le comportement mécanique et hydraulique de la craie. Les informations récoltées valident les hypothèses de conception et permettent une meilleure connaissance du comportement du terrain. Celle-ci servira à la réalisation d'études d'exécution poussées et à la détermination des méthodes constructives adéquates, tant pour le tunnel que pour les gares et les ouvrages annexes. Le retour d'expérience de ce marché sera bénéfique à la fois pour le maître d'ouvrage qui aura réduit le niveau de risque de ses travaux futurs, pour le maître d'œuvre qui aura fiabilisé ses études et pour les entreprises de travaux qui pourront adapter au mieux leurs méthodes dès les appels d'offre. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

SONDAGES DE RECONNAISSANCE PRÉALABLES :

- 1 sondage carotté, 2 sondages pressiométriques, 6 piézomètres, 2 puits de pompage

PAROI MOULÉE :

- Épaisseur : 0,80 m
- Longueur : 49 m
- Surface excavée : 1 650 m²
- Volume de béton mis en œuvre : 1 320 m³
- Aciers : 87 t

JET GROUTING :

- 4 colonnes de jet grouting de 20 m atteignant entre 16 et 36 m de profondeur.
- Un massif de 5 m de haut de 6 colonnes sécantes situé entre 31,00 et 36,00 m de profondeur

TERRASSEMENT DU PUITS ET RECONNAISSANCES À L'AVANCEMENT :

- 3 200 m³ de déblais de terrassement
- 11 levés de fond de fouille
- 7 essais de plaque réalisés accompagnés de nombreuses mesures extensométriques
- 7 relevés de convergence et 10 prélèvements de sol effectués
- 1 essai de plaque, et d'infiltration d'eau au sein du massif de colonnes de jet grouting

FORAGES ET INJECTION :

- 37 forages horizontaux sous sas d'une longueur cumulée de 320 m environ

TERRASSEMENT DU RAMEAU :

- 16 m³ de déblais de terrassement correspondant aux 4,00 m de longueur du rameau ; au cours du terrassement de celui-ci seront réalisés : 1 levé de fond de taille, 2 essais de plaque dont 1 horizontal et 1 vertical, un essai d'extensomètre, une mesure de cellule de pression interstitielle

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris

MAÎTRE D'ŒUVRE : Setec Tpi (mandataire), Ingerop Conseil & Ingénierie, Atelier Barani, Marc Barani Architectes, ar thème Associés, Brunet Saunier Architecture, Périphériques Architectes Marin+Trotin architectes, Périphérique Architectes Afja, Philippe Gazeau Architecture, Agence Duthilleul. Ingerop, associé à sa filiale Geos, assure notamment la conception et le suivi des travaux du puits.

ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE : Artelia Ville et Transport (mandataire), Arcadis Esg, Bg Ingénieurs Conseils

GROUPEMENT D'ENTREPRISES POUR LA RÉALISATION DE L'ENSEMBLE DES TRAVAUX :

Sade, mandataire du groupement, chargée des travaux d'installation de chantier, terrassement généraux, dispositif d'accès au fond de puits, rabattement de nappe, sécurité du puits, remise en état et repliement du chantier. Soletanche Bachy, cotraitante du groupement pour la réalisation des travaux de fondations profondes et d'essais associés (campagne de sondages de reconnaissances, paroi moulée, jet grouting, mesures de convergences, essais de plaques, forages et injections, relevés géologiques). Soletanche Bachy Tunnels, pour les travaux de terrassement et de confortement du rameau d'essai.

ABSTRACT

GRAND PARIS EXPRESS LINE 15 SOUTH. RECONNAISSANCE SHAFT AT BOULOGNE BILLANCOURT

R. PORET, SOLETANCHE BACHY - J. GEISTODT-KIENER, GC INGEROP - M. CAHN, GEOS

As part of the design process for the future line 15 of the Grand Paris Express, a test shaft is being executed at Boulogne Billancourt. The purpose of this programme is to obtain information on the soil's behaviour in order to validate the assumptions for construction of the future tunnels and stations. It entails the construction of a circular shaft 9.4 metres in diameter and 38 metres deep by the diaphragm wall method, with jet grouting columns inside the shaft and the excavation of a gallery in the chalk. A series of geotechnical tests is performed before and during execution of the shaft. □

GRAND PARIS EXPRESS LÍNEA 15 SUR. POZO DE RECONOCIMIENTO EN BOULOGNE BILLANCOURT

R. PORET, SOLETANCHE BACHY - J. GEISTODT-KIENER, GC INGEROP - M. CAHN, GEOS

En el marco del proceso de diseño de la futura línea 15 del Grand Paris Express, se ha perforado un pozo de pruebas en Boulogne Billancourt. Este proyecto tiene por objeto obtener información sobre el comportamiento del suelo para validar las hipótesis de construcción de los futuros túneles y estaciones. Incluye la realización de un pozo circular de 9,4 m de diámetro y 38 m de profundidad con pantalla continua, columnas de jet grouting en el interior del pozo y la excavación de una galería en la roca caliza. Se ha ejecutado una batería de ensayos geotécnicos antes y durante la realización del pozo. □