



## Grand Paris Express : traitement de sol par jet-grouting Keller sur la nouvelle ligne 17 Lot 1



**Christophe Fritsch**, directeur travaux  
et chef de projet travaux de la ligne 17,  
Keller Fondations Spéciales.

Dans le cadre des travaux du Grand Paris Express et de la réalisation de la nouvelle ligne 17, entre Le Bourget (Seine-Saint-Denis) et Gonesse (Val-d'Oise), le groupement Avenir (Demathieu Bard, Implénia, Pizzarotti et Bam) a confié à Keller Fondations Spéciales les travaux de traitement dans la masse des terrains en place par jet-grouting pour six ouvrages : OA3406, OA3407, OA3500, OA3503, OA3504 et OA3505.

### CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Les différentes investigations géotechniques menées sur le projet ont mis en évidence la présence de remblais sur les 2 à 3 premiers mètres, ainsi qu'un complexe marno-sableux compact jusqu'à 8 m de profondeur, et la formation des calcaires de Saint-Ouen jusqu'à 16 m de profondeur. S'ensuit la formation des sables de Beauchamp jusqu'à 26 m de profondeur, constituée d'alternance de niveaux sableux compacts à très compacts, avec des bancs gréseux et des passages argileux et d'horizons calcaires très rocheux (parfois poreux). À partir de 26 m de profondeur, on retrouve les formations de marnes et caillasses.

Le traitement par jet-grouting double à l'air est réalisé essentiellement dans les sables de Beauchamp, réputés difficilement injectables par méthodes classiques, avec des interfaces ponctuelles dans les marnes de Saint-Ouen ou dans les marnes et caillasses en profondeur.

### OBJECTIF DU TRAITEMENT

Les travaux de jet-grouting ont pour objectif de réduire la perméabilité des terrains afin de permettre le creusement des rameaux entre chaque puits et la galerie principale de la ligne 17.

Dans le cas présent, la valeur de perméabilité moyenne retenue pour la formation des sables de Beauchamp au

mémoire de synthèse géologique, géotechnique et hydrogéologique du DCE est de  $1,62 \cdot 10^{-4}$  m/s. Un des objectifs des travaux est l'obtention d'une perméabilité provisoire inférieure à  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Le jet-grouting est un procédé maîtrisé par Keller depuis plus de 40 ans, qui consiste à déstructurer le sol en profondeur à l'aide d'un jet rotatif à haute énergie cinétique sous des pressions supérieures à 400 bars en injectant un coulis de ciment pour obtenir des colonnes rigides constituées d'un mélange sol/ciment appelé communément « béton de sol ».

En fonction de la taille des ouvrages, le bloc de jet-grouting réalisé sous forme de colonnes sécantes est constitué de colonnes primaires de diamètre 1,80 m et de colonnes secondaires de diamètre 1,60 m, avec des profondeurs de forage jusqu'à 26 m et des longueurs de colonnes jusqu'à 13,50 m.

Sur certains ouvrages, comme l'OA3500, la présence de réseaux souterrains en service a nécessité la réalisation de nombreuses colonnes inclinées, pour échapper à l'emprise des réseaux et garantir un bloc de jet continu sur toute sa longueur.

### CHOIX INNOVANTS POUR LES TRAVAUX

Les propositions innovantes en matière de préparation, de suivi qualité et de contrôle des travaux ont confirmé le choix de la technique en jet-grouting pour ces 6 ouvrages.

#### 1. CHANTIER ENTIÈREMENT MODÉLISÉ SOUS BIM 3D

Keller a mis en place des méthodes de travail et une maquette numérique 3D (format Revit) réunissant les données intelligentes de son projet.

Dès la conception de la maquette et des plans de phasages d'exécution du jet-grouting, les colonnes ont été modélisées en 3D pour vérifier les bons recouvrements à chaque niveau de traitement.

L'implantation des colonnes a également été réalisée sur une base géo-référencée sur le modèle 3D, avec incrémentation journalière des positions réelles de chaque colonne exécutée.

Lors du forage, toutes les colonnes, sans exception, ont fait l'objet d'un contrôle par inclinomètre, pour vérifier la déviation de forage et réajuster la disposition des colonnes suivantes au fur et à mesure de l'avancement des travaux. L'incrément journalière a permis de s'assurer des recouvrements suffisants, sans réalisation de colonnes additionnelles, et d'obtenir un récolement de l'ouvrage à l'avancement des travaux, et un traitement conforme aux objectifs requis. Sur les ouvrages traités par Keller, la déviation constatée sur une profondeur de forage de 26 m était de l'ordre de 1 %, entraînant des adaptations limitées de la position et du diamètre des colonnes.

#### 2. TRAITEMENT PAR FILTRE-PRESSE DES SPOILS DE JET-GROUTING

Sur cette opération, Keller a proposé une solution innovante sur le plan environnemental, pour le traitement des spoils.

En effet, la réalisation des colonnes de jet-grouting a pour conséquence de générer un reflux important de ...

#### QUELQUES CHIFFRES :

- 14 000 ml de forages
- 20 000 m<sup>3</sup> mis en œuvre
- Profondeur : 26 m
- Colonnes de jet-grouting de 1,60 m et 1,80 m de diamètre



© Cédric Hebbly

Vue sur la foreuse.



© Keller

Stockage des spoils.



Travaux de Génie Civil,  
fondations et géothermie



Ouvrages béton armé,  
Reprise en sous-œuvre,  
Travaux de maçonnerie.

Murettes guide,  
Poutres de couronnement,  
Murettes pour pieux sécants.

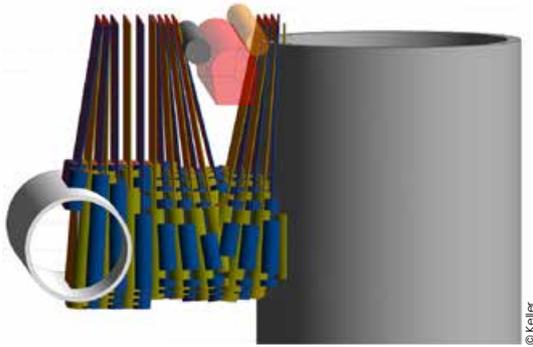
Raccordements géothermiques.



01 64 42 59 56

Z.I. Ampère - 54, rue de Maison-Rouge  
77 220 Gretz-Armainvilliers

www.groupepoisson.com



Modélisation 3D Jet Keller.

●●● matériaux liquides ou pâteux, inhérents à la technique, et qui sont stockés dans des bacs pour décantation, et évacués à la décharge.

Le travail en site urbain, avec des contraintes environnementales strictes et peu de place disponible sur chaque ouvrage, a incité Keller à mettre en place un filtre-presse de 20 t, capable de traiter en continu les *spoils* liquides. L'avantage de ce système a été de réduire de 2/3 les quantités d'eau contenues dans les *spoils* et d'obtenir un produit quasi sec (< 20 % d'eau) prêt à être évacué le jour même ou stocké sur un espace dédié.

10 m<sup>3</sup> de *spoils* liquides traités par cycle ont été transformés en 3 m<sup>3</sup> de matériaux secs à évacuer et en 7 m<sup>3</sup> d'eau à réutiliser – notamment pour le forage des colonnes et le lavage du matériel en fin de poste.

Grâce à cette innovation, environ 2/3 d'eau consommée ont été réutilisés, et plus de 50 % des déplacements vers les décharges ont été ainsi évités. Il en résulte une réduction de 50 % de volume en moins mis en décharge grâce au traitement préalable des *spoils* par la technique du filtre-presse Keller.

### 3. CONTRÔLE DU DIAMÈTRE DES COLONNES PAR MÉTHODE ACI (ACOUSTIC COLUMN INSPECTOR)

Ce système de contrôle qualité du diamètre des colonnes, mis au point par Keller depuis plus de 10 ans, se base sur des capteurs acoustiques installés sur des tiges métalliques de détection préforées dans le sol à la distance du diamètre voulu pour la colonne.

Grâce à un système d'enregistrements de paramètres et d'un boîtier d'écoute, le signal du jet à haute pression est enregistré lorsqu'il entre en contact avec la tige métallique sur toute la hauteur du forage. Ce système acoustique, très fiable et performant, permet d'adapter en direct les paramètres au sein des différentes couches de sol traversées par le traitement. Toutes les colonnes d'essai sont réalisées sous monitoring acoustique continu, ce qui permet de

caler de manière fiable les paramètres de production pour les différents diamètres à obtenir. En phase production, le contrôle est réalisé pour 5 % des colonnes. En cas de défaut du signal acoustique, les paramètres de production du diamètre supérieur sont adoptés et validés de manière immédiate par ACI. Ces paramètres sont adoptés dans le secteur concerné et un contrôle par carottage est ajouté au programme. Ces données sont intégrées au plan de contrôle mis en place par Keller, et font partie intégrante des enregistrements de paramètres de travail remis au client en fin de chantier.

### UN PLAN DE CONTRÔLE TRÈS STRICT DES TRAVAUX :

Dès la conception des plans, en phase de démarrage de chantier et durant toute la phase de production, un contrôle très pointu a été mis en place par Keller pour garantir l'atteinte des objectifs de traitement fixés. Les contrôles suivants ont été menés :

- une modélisation 3D des ouvrages avec géoréférencement des colonnes et contrôle de l'implantation de chaque colonne de jet-grouting ;
- plot d'essai préalable aux travaux pour déterminer les paramètres de travail ;
- réalisation des contrôles de diamètre par méthode ACI, à raison de 5 % des colonnes vérifiées sur chaque site ;
- suivi des déviations de forage par méthode inclinométrique sur toutes les colonnes ; mise à jour temps quotidienne du récolement 3D BIM pour vérifier l'épaisseur des points-triples ;
- contrôle de la fabrication du coulis d'injection (masse volumique, viscosité, ressuage, essais à la compression à 7, 14 et 28 jours sur éprouvettes 4 x 8 cm) ;
- contrôle des *spoils* depuis la surface (masse volumique, teneur en eau, essai à la compression à 7, 14 et 28 jours sur éprouvettes 11 x 22 cm) ;
- vérification de l'homogénéité du bloc de jet-grouting par carottages verticaux (contrôle de continuité et du recouvrement des colonnes) à raison de 2 unités par bloc et par carottages horizontaux depuis le fond du puits (vérification de la perméabilité du jet et mesures de débits d'eau avant terrassements du rameau) à raison de 8 unités par bloc ;
- essais à la compression sur les échantillons prélevés dans les carottages.

### MATÉRIEL DE FORAGE ET D'INJECTION DE POINTE :

Les colonnes de jet-grouting ont été exécutées à l'aide d'une foreuse KB6-2,

entièrement conçue par Keller. Cette foreuse d'un poids de 46 t dispose d'un mât rallongé de 37 m de hauteur, permettant des forages en continu sans changement de tiges jusqu'à 33,50 m de profondeur et avec une inclinaison avant et latérale jusqu'à 5°. Une cage de sécurité équipe également cette foreuse, ainsi qu'un dispositif lumineux adapté permettant de travailler à proximité de l'aéroport du Bourget (servitudes aériennes à respecter).

Une pompe haute pression Tecniwell TW700 et des buses d'injection de fabrication Keller ont également été mises en œuvre pour la réalisation du jet double (air-coulis).



Carottages dans jet-grouting.

La flexibilité du personnel Keller a permis de répondre aux attentes du groupement Avenir en termes de respect des délais, notamment par la mise en place de travaux en double poste sur chaque ouvrage. Les essais de perméabilité réalisés sur des prélèvements issus des carottages montrent une valeur moyenne de perméabilité de 6,9.10-10 m/s mesurée en laboratoire, et les essais Lugeon réalisés *in situ* montrent une valeur moyenne de perméabilité de 4,17.10-7 m/s. Les équipes Keller (production chantier, bureau d'études et méthodes), ont atteint tous les objectifs au niveau du traitement de sol, avec une mention particulière pour le respect des contraintes environnementales très strictes sur le chantier. La gestion des *spoils* par filtre-presse en est un exemple concret. La mise en place de moyens adaptés avec le groupement Avenir (gel, gants, masques, postes de lavage des mains, réunions et formations covid-19, etc.), a permis au spécialiste de travailler en toute sécurité pendant la crise sanitaire. ■

**Christophe Fritsch**

Directeur travaux et chef de projet  
travaux de la ligne 17,  
Keller Fondations Spéciales