

La « data » pour sécuriser la qualité des chantiers

Dans le cadre des projets du Grand Paris, le groupement Avenir (Demathieu et Bard - Implenia - Pizzaroti - BAM) avec Keller comme sous-traitant, réalise le lot 1 de la ligne 17, qui reliera Paris à l'aéroport Charles de Gaulle. Exemple du suivi 3D en continu de la réalisation des bouchons de jet-grouting sur cette ligne 17-1.

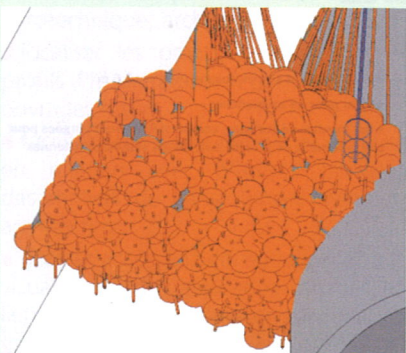


Vue globale du chantier.

PRÉSENTATION DU PROJET

Pendant la phase d'appel d'offres, le groupement a proposé une variante de traitement des connexions puits-tunnels étudiées avec Keller. Après adjudication du chantier au groupement avec cette variante intégrée, Keller a exécuté les travaux en s'appuyant notamment sur un système élaboré de traitement de données en temps réel.

Le lot 17-1 comporte près de 6 km de tunnels et deux gares, ainsi que 6 puits intermédiaires. Ces puits sont creusés à proximité du futur tunnel. Il convient ensuite de creuser les connexions entre le tunnel et les puits à des profondeurs de 25 à 30 m sous le terrain naturel, appelés rameaux.



Vue 3D du récolement des colonnes de jet grouting de IOA 3500.

Ces rameaux sont excavés de manière traditionnelle, sous nappe. Il est donc nécessaire de sécuriser cette phase de travaux en réalisant un bloc de jet-grouting qui englobe l'ensemble de la zone terrassée. Une sécurité d'au moins 2 m de sol traité autour des zones creusées a été établie pour garantir le creusement des rameaux.

GÉOTECHNIQUE : DES SABLES DE BEAUCHAMPS PEU FAVORABLES

Les sols rencontrés pour ce creusement sont les sables de Beauchamps, encadrés en haut par le marno-calcaire de Saint-Ouen, et en bas par les marnes et caillasses. Les bouchons de jet-grouting interféraient localement avec le Saint-Ouen et les marnes et caillasses, mais la couche géologique principale concernée est les sables de Beauchamps. Ces sables sont connus en région parisienne pour leurs caractéristiques difficiles à manier lors du terrassement.

En effet, cette couche n'a de sable que le nom, étant constitués globalement de sables très fins argileux, avec des passées d'argiles ou marnes franches, ainsi que des couches indurées. Ces sables sont compacts et gorgés d'eau et peuvent entraîner des phénomènes de boullance lors des terrassements. Il est donc indispensable de prévoir un

traitement préalable au terrassement sous nappe. Mais ces sables ne sont pas non plus injectables, de par leur granulométrie. La solution retenue fut un bloc de jet-grouting, traitant 100 % des sols de chaque volume.

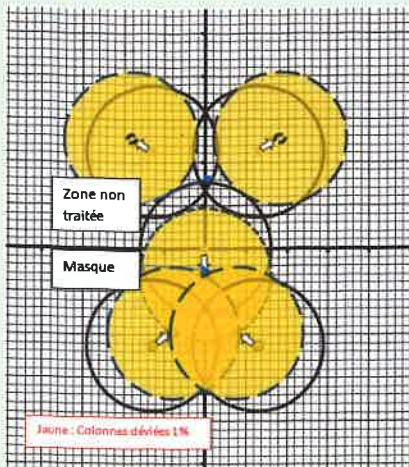
Les objectifs des blocs de jet-grouting étaient les suivants :

- renforcement des sols par un béton de sol avec une résistance de 3 MPa travaillant en voûte et sécurisant le front de taille ;
- débit résiduel faible permettant les travaux de terrassement et bétonnage des rameaux.

La nature des sables de Beauchamps est cependant peu propice au jet-grouting simple, étant géologiquement compacts, argileux et cohésifs. Il a fallu utiliser les dernières avancées techniques de Keller pour réaliser des diamètres significatifs. La technique retenue fut le jet double avec prédécoupage : un jet d'eau haute pression (500 bar) commence à découper le sol en place, aidé par un jet d'air qui le canalise et permet d'augmenter l'efficacité de la découpe. Puis, un deuxième passage mélange le sol prédécoupé avec le coulis de ciment pour créer un béton de sol. L'ajout d'air permet une meilleure remontée des spoils, diminuant les risques de soulèvement. Ce procédé est nécessairement accompagné d'un alésage important du trou de forage pour permettre une bonne remontée des spoils dans le vide annulaire entre le sol et les tiges de forages. L'emploi du matériel spécifique à Keller a permis d'obtenir des colonnes de diamètre 1,6 à 1,8 m de manière industrielle, avec des colonnes d'essais atteignant 2 m.

PROBLÉMATIQUE DES DÉVIATIONS

La profondeur du traitement est venue compliquer la problématique. Les Eurocodes indiquent une déviation possible de 2 % lors du forage. De fait, même en l'absence de blocs et avec des tiges de rigidité renforcée, les forages dévient rapidement de 1 %. Avec 30 m de profondeur, on parle donc de 30 voire 60 cm de déviation théorique pour une colonne, et potentiellement autant pour la colonne adjacente. Avec des rayons



Modélisation de déviation de colonnes d'1,6 m à 30 m, avec une déviation de 1 % uniquement au forage.

d'action de 90 cm à 1 m, il devient alors impossible de déterminer une maille réaliste entre colonnes: les colonnes se chevauchent alors tellement qu'il y a risque d'«écran» entre colonnes: la colonne primaire empêche la colonne secondaire de bien se développer.

Dans la recherche d'une étanchéité en jet-grouting, il est donc dangereux de déterminer une maille de jet-grouting en fonction du diamètre et ensuite de réaliser le jet-grouting sans se préoccuper des déviations. Le procédé de jet-grouting est un procédé de substitution des sols par un béton de sol et ne traite pas le sol en dehors de la zone de découpage – même à 10 cm, seules des fissures existantes sont traitées. Des fuites peuvent rapidement arriver en cas de déviation importante, avec des sinistres importants constatés lors de l'excavation.

SOLUTION : COLLECTER ET INTERPRÉTER LES DONNÉES EN DIRECT

Keller a donc utilisé les derniers outils développés pour sécuriser et rationaliser l'approche de ce type de blocs de jet-grouting en profondeur. L'idée est de suivre en direct les travaux réalisés, en termes de déviation et de diamètre, pour adapter la suite des travaux aux colonnes déjà réalisées :

- mesure systématique de la déviation pour 100 % des colonnes, grâce à des mesures inclinométriques dans les forages. La procédure est la suivante :
 1. forage à la profondeur recherchée ;
 2. dévissage de la tige au-dessus du sol ;
 3. géolocalisation du haut du train de tige laissé dans le sol ;
 4. passage d'une sonde inclinométrique adaptée dans le train de tige ;
 5. envoi des *data* vers le logiciel 3D.

- mesure régulière des diamètres obtenus en direct grâce au système ACI, développé par Keller. Ce système breveté consiste à mettre en place temporairement des tiges métalliques dans le sol à une distance connue du forage. Le passage du jet haute pression sur ces tiges crée des ondes caractéristiques qui sont enregistrées par une sonde. Les données de la sonde et de la foreuse sont asservies pour connaître la profondeur et les caractéristiques du jet correspondant. Si le jet touche la tige, le diamètre réel est supérieur à la distance mesurée. Du fait des grandes profondeurs, il est bien sûr réalisé des mesures inclinométriques sur les tiges pour vérifier les positions relatives des tiges et du forage du jet avec la profondeur.

Plusieurs tiges métalliques peuvent être mises pour la même colonne. La remontée du jet-grouting est ensuite adaptée en direct en fonction des résultats de l'ACI.

Les mesures de diamètre à l'ACI sont faites sur les premières colonnes de production et permettent de corrélérer les paramètres obtenus avec les diamètres correspondants. Cela permet de garantir et d'adapter les diamètres des colonnes suivantes, et ainsi créer une cartographie des paramètres de jet-grouting en 3D, suivant les variations géologiques. Et ces variations géologiques sont apparues sur de petites distances lors de certains plots du fait de l'hétérogénéité des sables de Beauchamps.

- l'ensemble de ces données sont intégrées dans un modèle 3D sur le logiciel Revit, avec une mise à jour journalière des travaux réalisés.

Grâce à ces collectes de données, les travaux de jet-grouting ne se déroulent pas à l'aveugle. Il est possible de déterminer précisément la géométrie des colonnes réalisées et leur position relative entre elles. Et donc, déterminer la géométrie optimisée des futures colonnes pour assurer un traitement optimal du bloc.

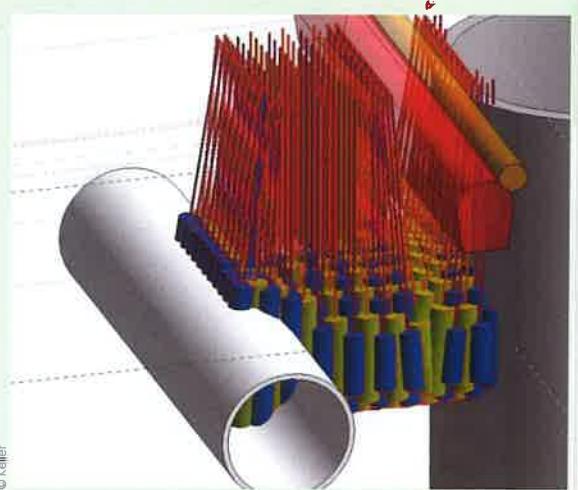
La procédure sur chantier fut la suivante :

- maille triangulaire originelle de 1,3 m pour des colonnes de 1,6 m, maille couramment rencontrée dans les DCE de la SGP ;
- réalisation d'une ligne primaire de colonnes de diamètre 1,80 m avec mesures de déviation systématique, et vérification des premières colonnes de production à l'ACI et vérification en continu d'un échantillon de colonnes en phase de production industrielle ;
- analyse des données dans le logiciel 3D pour déterminer la nouvelle position et le diamètre optimal des colonnes secondaires, diamètre variant entre 1,60 m si peu de déviation et 1,80 m en cas de déviations importantes ;

- réalisation des lignes de colonnes secondaires, avec suivi systématique des déviations en direct: la position de la colonne précédente influe sur la colonne à réaliser. Et parfois même la mesure en direct de la déviation d'une colonne permet d'anticiper un changement de diamètre pour assurer au mieux le contact avec les colonnes déjà réalisées ;

- analyse des données pour repérer des éventuels trous dans le bloc. Et ajout de colonnes complémentaires tertiaires localement en cas de défaut.

L'ensemble des données collectées sont ensuite insérées dans le modèle BIM du projet global.



Vue 3D du rameau OA3500.

RÉSULTAT

Cette procédure a permis de prévoir au plus juste les colonnes de jet-grouting. Elle a un coût, car elle ralentit la production du jet-grouting à chaque étape de mesure, mais elle garantit un travail de qualité au droit des bouchons. Cette qualité fut confirmée à l'ouverture des rameaux. L'aspect caractéristique du ciment rencontré sur la hauteur du front de taille montrait que le sol était traité de manière uniforme, avec des débits bien inférieurs aux objectifs convenus. L'excavation des différents rameaux s'est donc déroulée dans de bonnes conditions pour les équipes du groupe-ment Avenir. ■

Benoit Paineau

Responsable commercial grands projets
Keller

Vincent Bourcey

Ingénieur travaux principal
petites perforations et injections
Keller

La « data » pour sécuriser la qualité des chantiers

Dans le cadre des projets du Grand Paris, le groupement Avenir (Demathieu et Bard - Implenia - Pizzaroti - BAM) avec Keller comme sous-traitant, réalise le lot 1 de la ligne 17, qui reliera Paris à l'aéroport Charles de Gaulle. Exemple du suivi 3D en continu de la réalisation des bouchons de jet-grouting sur cette ligne 17-1.

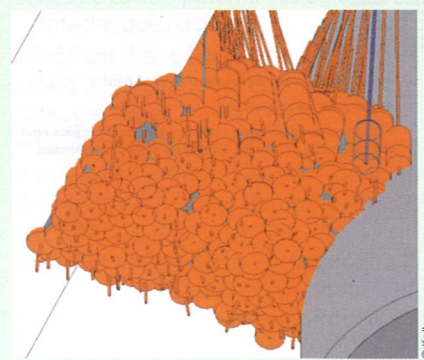


Vue globale du chantier.

PRÉSENTATION DU PROJET

Pendant la phase d'appel d'offres, le groupement a proposé une variante de traitement des connexions puits-tunnels étudiées avec Keller. Après adjudication du chantier au groupement avec cette variante intégrée, Keller a exécuté les travaux en s'appuyant notamment sur un système élaboré de traitement de données en temps réel.

Le lot 17-1 comporte près de 6 km de tunnels et deux gares, ainsi que 6 puits intermédiaires. Ces puits sont creusés à proximité du futur tunnel. Il convient ensuite de creuser les connexions entre le tunnel et les puits à des profondeurs de 25 à 30 m sous le terrain naturel, appelés rameaux.



Vue 3D du récolement des colonnes de jet grouting de IOA 3500.

Ces rameaux sont excavés de manière traditionnelle, sous nappe. Il est donc nécessaire de sécuriser cette phase de travaux en réalisant un bloc de jet-grouting qui englobe l'ensemble de la zone terrassée. Une sécurité d'au moins 2 m de sol traité autour des zones creusées a été établie pour garantir le creusement des rameaux.

GÉOTECHNIQUE : DES SABLES DE BEAUCHAMPS PEU FAVORABLES

Les sols rencontrés pour ce creusement sont les sables de Beauchamps, encadrés en haut par le marno-calcaire de Saint-Ouen, et en bas par les marnes et caillasses. Les bouchons de jet-grouting interféraient localement avec le Saint-Ouen et les marnes et caillasses, mais la couche géologique principale concernée est les sables de Beauchamps. Ces sables sont connus en région parisienne pour leurs caractéristiques difficiles à manier lors du terrassement.

En effet, cette couche n'a de sable que le nom, étant constitués globalement de sables très fins argileux, avec des passées d'argiles ou marnes franches, ainsi que des couches indurées. Ces sables sont compacts et gorgés d'eau et peuvent entraîner des phénomènes de boulangerie lors des terrassements. Il est donc indispensable de prévoir un

traitement préalable au terrassement sous nappe. Mais ces sables ne sont pas non plus injectables, de par leur granulométrie. La solution retenue fut un bloc de jet-grouting, traitant 100 % des sols de chaque volume.

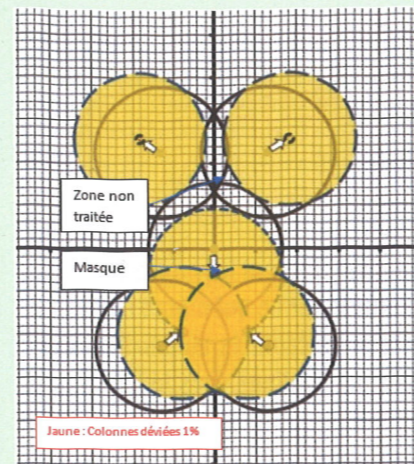
Les objectifs des blocs de jet-grouting étaient les suivants :

- renforcement des sols par un béton de sol avec une résistance de 3 MPa travaillant en voûte et sécurisant le front de taille ;
- débit résiduel faible permettant les travaux de terrassement et bétonnage des rameaux.

La nature des sables de Beauchamps est cependant peu propice au jet-grouting simple, étant géologiquement compacts, argileux et cohésifs. Il a fallu utiliser les dernières avancées techniques de Keller pour réaliser des diamètres significatifs. La technique retenue fut le jet double avec prédécoupage : un jet d'eau haute pression (500 bar) commence à découper le sol en place, aidé par un jet d'air qui le canalise et permet d'augmenter l'efficacité de la découpe. Puis, un deuxième passage mélange le sol prédécoupé avec le coulis de ciment pour créer un béton de sol. L'ajout d'air permet une meilleure remontée des spoils, diminuant les risques de soulèvement. Ce procédé est nécessairement accompagné d'un alésage important du trou de forage pour permettre une bonne remontée des spoils dans le vide annulaire entre le sol et les tiges de forages. L'emploi du matériel spécifique à Keller a permis d'obtenir des colonnes de diamètre 1,6 à 1,8 m de manière industrielle, avec des colonnes d'essais atteignant 2 m.

PROBLÉMATIQUE DES DÉVIATIONS

La profondeur du traitement est venue compliquer la problématique. Les Eurocodes indiquent une déviation possible de 2 % lors du forage. De fait, même en l'absence de blocs et avec des tiges de rigidité renforcée, les forages dévient rapidement de 1 %. Avec 30 m de profondeur, on parle donc de 30 voire 60 cm de déviation théorique pour une colonne, et potentiellement autant pour la colonne adjacente. Avec des rayons



Modélisation de déviation de colonnes d'1,6 m à 30 m, avec une déviation de 1 % uniquement au forage.

d'action de 90 cm à 1 m, il devient alors impossible de déterminer une maille réaliste entre colonnes : les colonnes se chevauchent alors tellement qu'il y a risque d'« écran » entre colonnes : la colonne primaire empêche la colonne secondaire de bien se développer.

Dans la recherche d'une étanchéité en jet-grouting, il est donc dangereux de déterminer une maille de jet-grouting en fonction du diamètre et ensuite de réaliser le jet-grouting sans se préoccuper des déviations. Le procédé de jet-grouting est un procédé de substitution des sols par un béton de sol et ne traite pas le sol en dehors de la zone de découpage – même à 10 cm, seules des fissures existantes sont traitées. Des fuites peuvent rapidement arriver en cas de déviation importante, avec des sinistres importants constatés lors de l'excavation.

SOLUTION : COLLECTER ET INTERPRÉTER LES DONNÉES EN DIRECT

Keller a donc utilisé les derniers outils développés pour sécuriser et rationaliser l'approche de ce type de blocs de jet-grouting en profondeur. L'idée est de suivre en direct les travaux réalisés, en termes de déviation et de diamètre, pour adapter la suite des travaux aux colonnes déjà réalisées :

- mesure systématique de la déviation pour 100 % des colonnes, grâce à des mesures inclinométriques dans les forages. La procédure est la suivante :

1. forage à la profondeur recherchée ;
2. dévissage de la tige au-dessus du sol ;
3. géolocalisation du haut du train de tige laissé dans le sol ;
4. passage d'une sonde inclinométrique adaptée dans le train de tige ;
5. envoi des *data* vers le logiciel 3D.

■ mesure régulière des diamètres obtenus en direct grâce au système ACI, développé par Keller. Ce système breveté consiste à mettre en place temporairement des tiges métalliques dans le sol à une distance connue du forage. Le passage du jet haute pression sur ces tiges crée des ondes caractéristiques qui sont enregistrées par une sonde. Les données de la sonde et de la foreuse sont asservies pour connaître la profondeur et les caractéristiques du jet correspondant. Si le jet touche la tige, le diamètre réel est supérieur à la distance mesurée. Du fait des grandes profondeurs, il est bien sûr réalisé des mesures inclinométriques sur les tiges pour vérifier les positions relatives des tiges et du forage du jet avec la profondeur.

Plusieurs tiges métalliques peuvent être mises pour la même colonne. La remontée du jet-grouting est ensuite adaptée en direct en fonction des résultats de l'ACI.

Les mesures de diamètre à l'ACI sont faites sur les premières colonnes de production et permettent de corréler les paramètres obtenus avec les diamètres correspondants. Cela permet de garantir et d'adapter les diamètres des colonnes suivantes, et ainsi créer une cartographie des paramètres de jet-grouting en 3D, suivant les variations géologiques. Et ces variations géologiques sont apparues sur de petites distances lors de certains plots du fait de l'hétérogénéité des sables de Beauchamps.

- l'ensemble de ces données sont intégrées dans un modèle 3D sur le logiciel Revit, avec une mise à jour journalière des travaux réalisés.

Grâce à ces collectes de données, les travaux de jet-grouting ne se déroulent pas à l'aveugle. Il est possible de déterminer précisément la géométrie des colonnes réalisées et leur position relative entre elles. Et donc, déterminer la géométrie optimisée des futures colonnes pour assurer un traitement optimal du bloc.

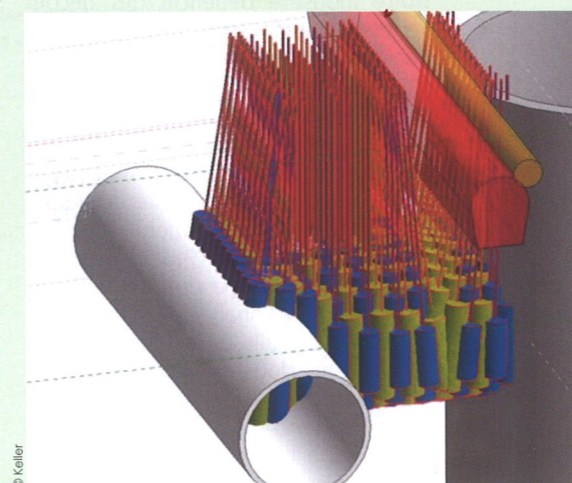
La procédure sur chantier fut la suivante :

- maille triangulaire originelle de 1,3 m pour des colonnes de 1,6 m, maille couramment rencontrée dans les DCE de la SGP ;
- réalisation d'une ligne primaire de colonnes de diamètre 1,80 m avec mesures de déviation systématique, et vérification des premières colonnes de production à l'ACI et vérification en continu d'un échantillon de colonnes en phase de production industrielle ;
- analyse des données dans le logiciel 3D pour déterminer la nouvelle position et le diamètre optimal des colonnes secondaires, diamètre variant entre 1,60 m si peu de déviation et 1,80 m en cas de déviations importantes ;

■ réalisation des lignes de colonnes secondaires, avec suivi systématique des déviations en direct : la position de la colonne précédente influe sur la colonne à réaliser. Et parfois même la mesure en direct de la déviation d'une colonne permet d'anticiper un changement de diamètre pour assurer au mieux le contact avec les colonnes déjà réalisées ;

- analyse des données pour repérer des éventuels trous dans le bloc. Et ajout de colonnes complémentaires tertiaires localement en cas de défaut.

L'ensemble des données collectées sont ensuite insérées dans le modèle BIM du projet global.



Vue 3D du rameau OA3500.

RÉSULTAT

Cette procédure a permis de prévoir au plus juste les colonnes de jet-grouting. Elle a un coût, car elle ralentit la production du jet-grouting à chaque étape de mesure, mais elle garantit un travail de qualité au droit des bouchons. Cette qualité fut confirmée à l'ouverture des rameaux. L'aspect caractéristique du ciment rencontré sur la hauteur du front de taille montrait que le sol était traité de manière uniforme, avec des débits bien inférieurs aux objectifs convenus. L'excavation des différents rameaux s'est donc déroulée dans de bonnes conditions pour les équipes du groupement Avenir. ■

Benoît Paineau

Responsable commercial grands projets
Keller

Vincent Bourcey

Ingénieur travaux principal
petites perforations et injections
Keller