



1a- Enceinte en paroi berlinoise permettant la réalisation des forages de compensation.

1a- Chamber in Berlin-type retaining wall allowing performance of compensation grouting drilling.

© SOLETANCHE BACHY

TUNNEL DE TOULON TUBE SUD INJECTIONS DE COMPENSATION SOUS DEUX BATIMENTS

AUTEURS : ALAIN GUILLOUX, TERRASOL - HERVÉ LE BISSONNAIS, TERRASOL - ROBIN BETEND, SOLETANCHE BACHY - GILLES BOYER, SOLETANCHE BACHY TUNNELS

UN CONTEXTE GÉOLOGIQUE DÉFAVORABLE, UN SITE PARTICULIÈREMENT CONTRAINT... SONT PARMI LES NOMBREUSES DIFFICULTÉS DE CE CHANTIER DU TUNNEL DE TOULON TUBE SUD, SITUÉ DANS UN ENVIRONNEMENT FORTEMENT URBANISÉ ET COMPLEXE. SOLUTIONS MISES EN ŒUVRE : UN SOUTÈNEMENT TRÈS RIGIDE, AVEC RENFORCEMENT DU FRONT PAR COLONNES DE JET GROUTING ET VOÛTE PARAPLUIE, ET RECOURS DANS UNE ZONE À DES INJECTIONS DE COMPENSATION.



© SOLETANCHE BACHY

1b

UN ENVIRONNEMENT TRÈS DIFFICILE

L'excavation du tube Sud du tunnel de Toulon s'inscrit dans un environnement difficile du fait de sa situation sous le centre-ville ancien de Toulon et de son contexte géologique et géotechnique très complexe.

La zone comprise entre les PM 1670 et 1720 dite « Fabié – Marchand » constitue un « concentré » de ces difficultés.

1b- Forage en cours pour mise en place des tubes à manchettes métalliques.

1b- Drilling in progress for placing tubes with metallic spool pieces.

En effet, ce secteur est marqué par un contexte géologique défavorable qui a conduit aux plus fortes déformations lors de l'excavation du tube Nord (100 à 150 mm) et par un fontis majeur débouchant en surface ayant conduit à l'arrêt de l'excavation pendant plus d'une année.

De plus, dans le cas du tube Sud, il se trouve directement sous 2 bâtis R+7 datant des années 1950 (nommés K6

– l'Esplanade et K7 – le Dauphin). Dès le début des études du projet en 2003, ce secteur avait été identifié comme étant particulièrement difficile : les deux bâtiments avaient en effet déjà subi des déformations liées au creusement du premier tube et les premières reconnaissances par sondages montraient la présence de terrain de qualité particulièrement médiocre (poches d'argile molle issue de la dissolution du gypse).

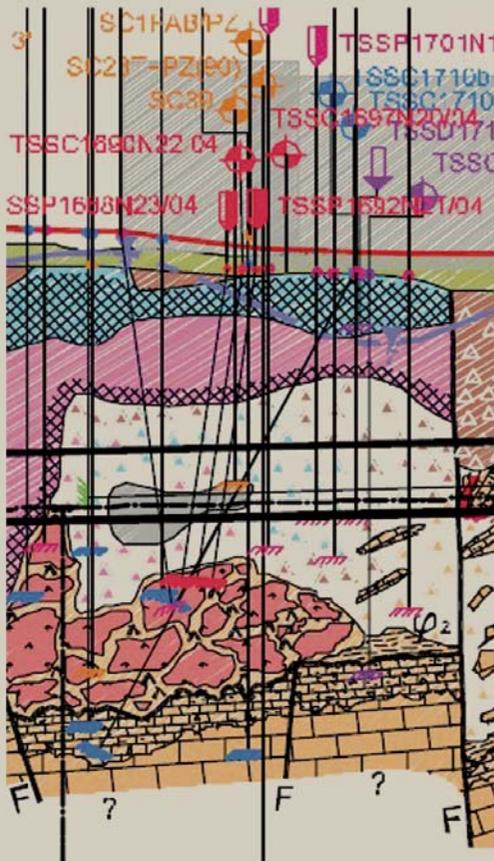
Un soutènement très rigide avec renforcement du front par colonnes de jet grouting et voûte parapluie avait été défini, avec recours à des injections de compensation en tranche conditionnelle en cas de déformations trop importantes en surface.

Pour optimiser la sécurité et le délai global de l'opération, il avait également été décidé de réaliser l'excavation de ce secteur par deux attaques intermédiaires (nommées attaque Marchand Ouest et Est) à partir d'un puits d'accès.

DESCRIPTION GÉOLOGIQUE DU SECTEUR MARCHAND

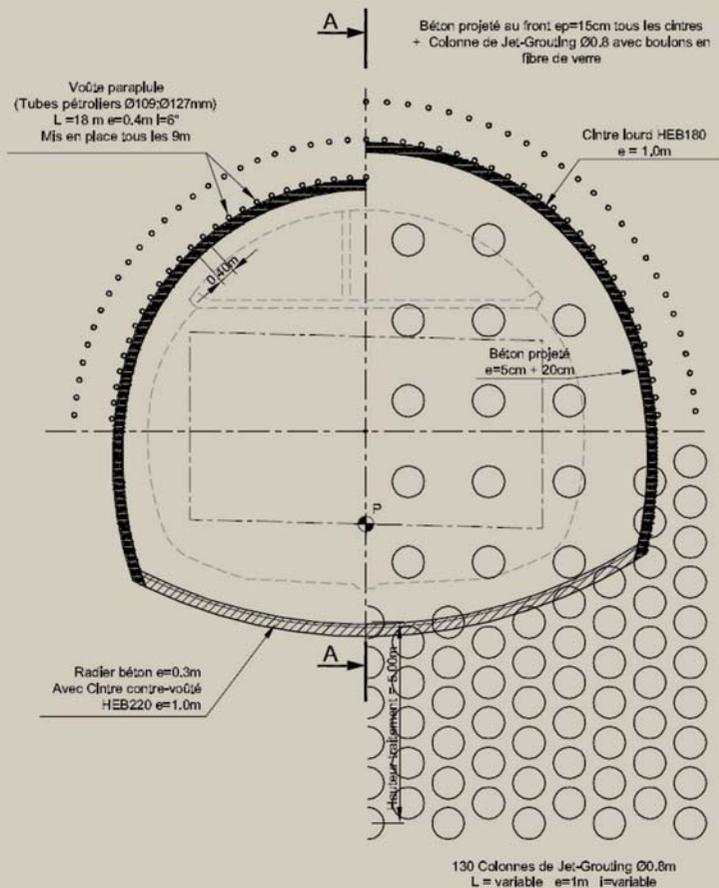
Le secteur de la rue Fabié et de la voie Tessé se situe en extrémité Est d'une importante zone de charriage, constituée de brèches argilo-silteuses hétérogènes, déstructurées et altérées. La base des brèches est en contact avec les formations du Muschelkalk par l'intermédiaire d'un plan de décollement nommé φ_2 situé à proximité du radier du tunnel. Ce plan de chevauchement est caractérisé par la présence de gypse, au toit du Muschelkalk. ▷

ZONE MARCHAND - GÉOLOGIE



2

PROFIL PS8 DÉFINI AU MARCHÉ



3

Ce gypse a tendance à se décomposer localement en présence d'eau, en formant une argile noire très plastique. Le radier du tunnel est situé à environ 40 m de profondeur.

La zone délicate concerne environ 38 ml à l'Est du puits intermédiaire, avec environ 20 ml sous le bâti.

Le secteur a fait l'objet de très nombreux sondages (forages carottés, sondages pressiométriques) et d'un plot d'essais en 2006 pour tester la faisabilité de réalisation de colonnes de jet grouting et d'injections dans ces formations.

Ces reconnaissances ont permis :

→ De confirmer la présence de poches d'argile molle noire, issue de la dissolution du gypse à proximité de la semelle de charriage. Ces poches sont majoritairement situées en partie inférieure de la section d'excavation et sous le radier du tunnel ;

→ De confirmer la faisabilité du traitement par jet grouting des pélites et des brèches du permien charrié ;

→ De montrer la faible efficacité de traitement par injection et l'extrême réactivité du terrain (plusieurs cm de

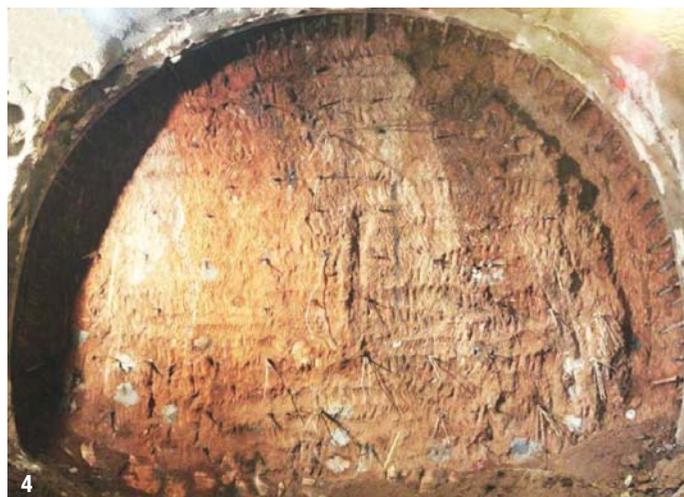
soulèvement en surface avec des injections à plus de 35 m de profondeur).

HISTORIQUE DE L'ATTAQUE MARCHAND CHOIX DE LA MÉTHODE DE CREUSEMENT

À l'issue des études projet et du plot d'essai, après avoir examiné avec le maître d'ouvrage et ses assistants

(CETU, CETE, groupe d'experts) la faisabilité d'un grand nombre de méthodes envisageables (entre autres : excavation phasée de type nouvelle méthode autrichienne, présoutènement en voûte parapluie par tubes foncés ou réalisés par micro-tunnelier avec remplissage béton), il a été retenu une méthode ayant déjà fait ses preuves lors de la reprise du creu-

sement du tube Nord après le fontis. Cette méthode (figure 3) consiste à renforcer de manière très importante la section d'excavation et la zone située sous le radier par colonnes de jet grouting subhorizontales, complété par une voûte parapluie particulièrement rigide (50 tubes parapluies de 18 ml, diamètres 109/127 mis en place tous les 9 ml).



4

2- Zone Marchand – géologie.

3- Profil PS8 défini au marché.

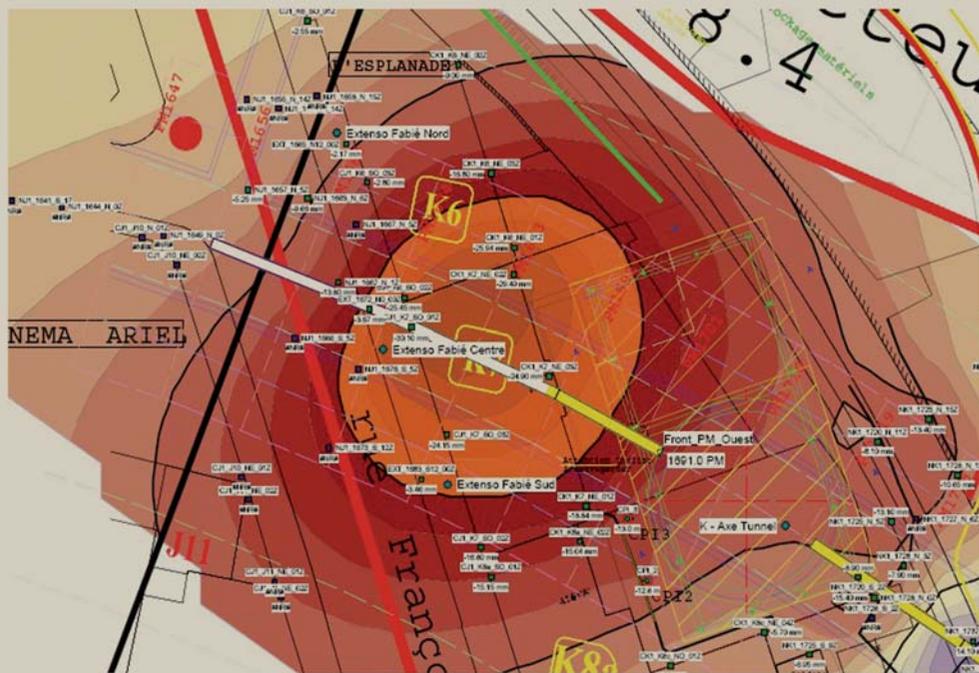
4- Front au PM 1701 le 02/03/2009.

2- Marchand area – geology.

3- PS8 profile defined in the contract.

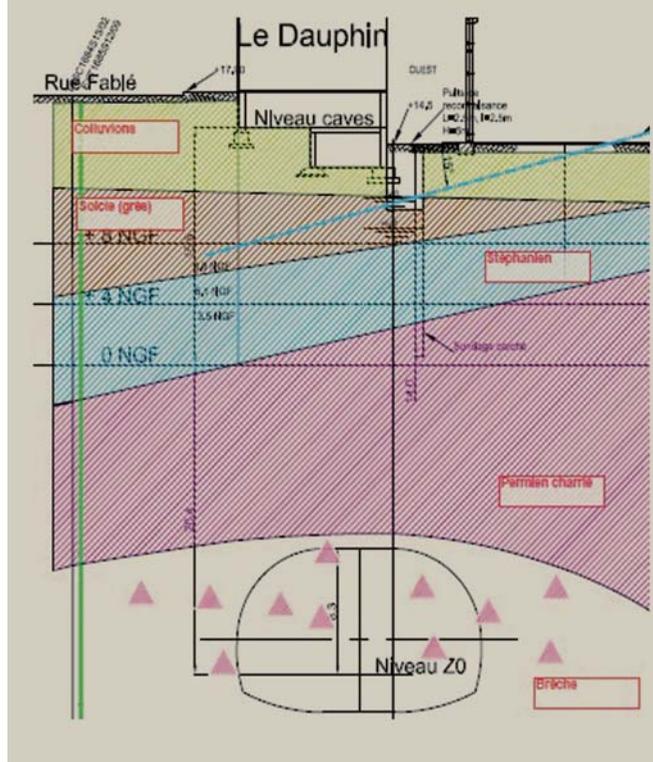
4- Tunnel face at PM 1701 on 2.3.2009.

CUVETTE DE TASSEMENT



5

IMPLANTATION DU MATELAS DE RÉPARTITION



6

5- Cuvette de tassement.
6- Implantation du matelas de répartition.

5- Subsidence basin.
6- Layout of load distributing mattress.

DÉBUT DES TRAVAUX D'EXCAVATION

Le puits Marchand (16 m de diamètre) a été réalisé en paroi moulée de 1,2 m d'épaisseur et 55 m de profondeur à l'aide d'une hydrofraise. Le radier se situe à 38 m de profondeur. Le front de l'attaque vers l'Ouest est à quelques mètres de la façade du bâtiment K7. Bien qu'aucune difficulté particulière n'ait été constatée, la réalisation des différentes opérations à proximité des bâtis (paroi moulée, terrassements de puits, sondages de reconnaissance, voûte parapluie, colonnes de jet grouting) a conduit à environ 12 mm de tassement du K7, confirmant la sensibilité du terrain.

Dès le démarrage de l'attaque Ouest parapluie) : si au droit de l'excavation, le terrain était de nature compacte avec des déformations en tunnel et en surface tout à fait normales et conformes aux prévisions, il a été constaté des déformations en surface très en avant du front et nettement supérieures aux

prévisions : en effet, à plus de 25 m du front, il était mesuré après 9 m d'excavation plusieurs millimètres de tassement avec des vitesses de l'ordre de 0,5 mm/j, au niveau de la façade Ouest des bâtiments K6 et K7. Une cuvette centrée à la jonction des deux bâtiments commençait à se former, dans une zone que le traitement par colonnes de jet grouting n'avait pas encore pu atteindre (figure 4). De plus, le bâti K6 (R+7) commençait à subir des désordres significatifs sur le second œuvre alors que les tassements mesurés en surface étaient relativement faibles (de l'ordre de 25 mm). Le bâtiment K7, avec un niveau de déformation légèrement plus important, se comportait de manière plus normale, sans désordre significatif. Après avoir réalisé le traitement par jet grouting prévu au marché sur toute la zone située sous le bâti, les prévisions de déformations maximales effectuées par les différents intervenants étaient pour les tassements absolus de l'ordre de 60 à 70 mm (figure 5), avec des tassements différentiels de 1,8 ‰, soit de l'ordre de grandeur des seuils d'alerte fixés au marché pour ce secteur (66 mm en absolu et 1,8 mm/m en différentiel).

Vu le comportement anormal du bâtiment K6 et le niveau de déformation envisagé, le Bureau Veritas, en charge du suivi du bâti pour le maître d'ouvrage, a estimé que le bâti ne serait pas capable de supporter les déformations supplémentaires générées par le passage du tunnel. L'arrêt de l'excavation a alors été demandé par le maître d'ouvrage, avec un tassement absolu qui avait atteint 32 mm pour le K6. Plusieurs solutions ont été envisagées pour la poursuite de l'excavation :

→ Un confortement du bâti avec mise en place de renforts métalliques à partir des caves ;
→ Une évacuation du bâtiment avec la poursuite du creusement selon la méthode de base renforcée puis la réparation de l'immeuble ;
→ La solution injection de compensation envisagée en tranche conditionnelle au marché. Cette solution ne faisait pas l'unanimité des intervenants du fait de l'absence de retour d'expérience dans un terrain aussi hétérogène que le sous-sol de Toulon et de la nécessité d'imposer des critères particulièrement stricts vis-à-vis des déformations du bâti encore acceptables, en limite de ce qui avait déjà pu être réalisé sur d'autres expériences similaires.

Plusieurs solutions ont été envisagées pour la poursuite de l'excavation :

→ Un confortement du bâti avec mise en place de renforts métalliques à partir des caves ;
→ Une évacuation du bâtiment avec la poursuite du creusement selon la méthode de base renforcée puis la réparation de l'immeuble ;
→ La solution injection de compensation envisagée en tranche conditionnelle au marché. Cette solution ne faisait pas l'unanimité des intervenants du fait de l'absence de retour d'expérience dans un terrain aussi hétérogène que le sous-sol de Toulon et de la nécessité d'imposer des critères particulièrement stricts vis-à-vis des déformations du bâti encore acceptables, en limite de ce qui avait déjà pu être réalisé sur d'autres expériences similaires.

L'arrêt de l'excavation a alors été demandé par le maître d'ouvrage, avec un tassement absolu qui avait atteint 32 mm pour le K6.

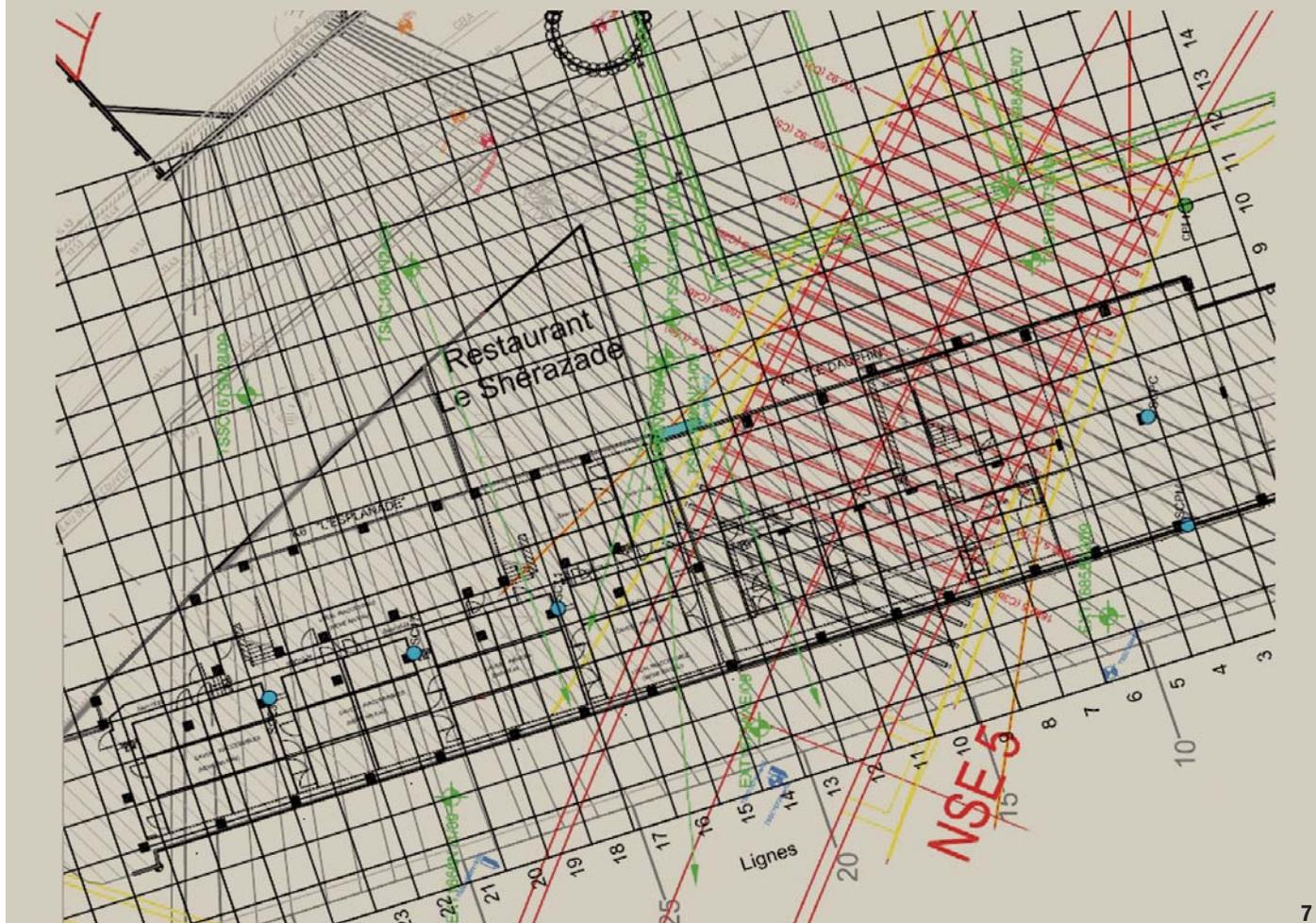
Plusieurs solutions ont été envisagées pour la poursuite de l'excavation :

→ Un confortement du bâti avec mise en place de renforts métalliques à partir des caves ;

→ Une évacuation du bâtiment avec la poursuite du creusement selon la méthode de base renforcée puis la réparation de l'immeuble ;

→ La solution injection de compensation envisagée en tranche conditionnelle au marché. Cette solution ne faisait pas l'unanimité des intervenants du fait de l'absence de retour d'expérience dans un terrain aussi hétérogène que le sous-sol de Toulon et de la nécessité d'imposer des critères particulièrement stricts vis-à-vis des déformations du bâti encore acceptables, en limite de ce qui avait déjà pu être réalisé sur d'autres expériences similaires.

IMPLANTATION DES FORAGES POUR INJECTION



7 © SOLETAICHE BACHY

La première solution a d'abord été retenue et étudiée de manière approfondie par le Bureau Veritas, pour finalement aboutir à une impossibilité technique du fait d'une structure des fondations plus complexe que prévue (découverte lors des reconnaissances complémentaires d'une file d'appuis intermédiaires non connue lors du diagnostic du bâti).

De ce fait, il a finalement été décidé de mettre en place un dispositif d'injections de compensation dans le terrain sous les fondations des immeubles K6 et K7 afin de limiter les tassements lors de la reprise, et d'éventuellement redresser les bâtiments au préalable. Des critères très stricts d'augmentation acceptables de tassements différentiels ont été imposés, afin de limiter toutes nouvelles dégradations structurelles du bâti.

Ces critères d'augmentation ou de diminution de la pente initiale ont été fixés entre les 2 limites suivantes : +1.2 ‰ en soulèvement et -0.5 ‰ en tassement.

PRÉSENTATION DU DISPOSITIF PRINCIPE DES INJECTIONS DE COMPENSATION

Le principe de base des injections de compensation est d'éviter le tassement en surface lié à l'excavation, en injectant des quantités de coulis dosées avec précision entre le tunnel et le bâtiment. La localisation des points d'injection et les quantités de coulis mises en œuvre sont adaptées en permanence aux différentes mesures réalisées sur le bâtiment et sur le terrain en temps réel. Les injections de compensation nécessitent trois phases principales :

- La réalisation d'un matelas de répartition entre le tunnel et le bâti par injection de coulis à partir de forages subhorizontaux ;
- Une phase de conditionnement servant à étalonner le dispositif, complétée pour ce chantier par un pré-soulèvement ;
- Une phase de compensation pendant l'excavation du tunnel sous les bâtis.

7- Implantation des forages pour injection. 8- Plate-forme d'injection.

7- Layout of boreholes for grout injection. 8- Grout injection platform.

LE MATELAS DE RÉPARTITION

La première difficulté du projet d'injection de compensation appliqué aux bâtiments K6 et K7 a été de déterminer la position du matelas de répartition, en fonction de la position des fondations et de la nature géologique du sous sol. D'importantes reconnaissances complémentaires du niveau de fondations des bâtiments ont été menées depuis les



8 © SOLETAICHE BACHY

caves et en façade extérieure (fouilles manuelles, sondages carottés de 3 à 5 ml), montrant une altitude très variable de la base des semelles superficielles. De nouveaux sondages de reconnaissance ont également été réalisés pour montrer que les variations importantes des faciès situés sous les fondations (colluvions, socle gréseux, lambeaux de schiste du Stéphien, pélites du Permien) ne permettaient pas d'implanter la totalité des forages dans une seule formation homogène (figure 6).

9- Dispositif d'auscultation sur le bâtiment K6.

10- Schéma du dispositif d'injection.

9- Monitoring system on building K6.

10- Schematic of the grout injection system.

Plutôt que de rechercher une géologie homogène nécessitant d'approfondir la fosse nécessaire à la réalisation des forages ou la réalisation de forages inclinés, une position du matelas de répartition relativement proche des semelles (entre 5 et 10 m) a été retenue. Pour réaliser ces forages en limitant leurs inclinaisons et leurs longueurs, plusieurs solutions ont été étudiées :

→ Réalisation des forages depuis une plate-forme intermédiaire implantée dans le puits Marchand existant :

l'intérêt de cette solution était d'éviter la réalisation de nouveaux terrassements, et d'avoir la possibilité de réaliser les forages à une profondeur plus importante. Cette solution n'a pas été retenue car elle nécessitait la réalisation de forages de grande longueur pour atteindre l'ensemble de la zone à compenser ;

→ Réalisation de nouveaux puits de diamètre plus réduits : cette solution permettait de mieux optimiser les longueurs de forages, mais elle a également été écartée car elle nécessitait la réalisation de deux nouveaux ouvrages importants et conduisait à une surface de travail réduite pour chaque zone d'injection ;

→ Réalisation d'une plate-forme en tranchée : cette dernière solution a été finalement retenue car elle permettait, avec des terrassements relativement réduits sans ouvrage de soutènement complexe, d'avoir rapidement une plate-forme de surface importante.

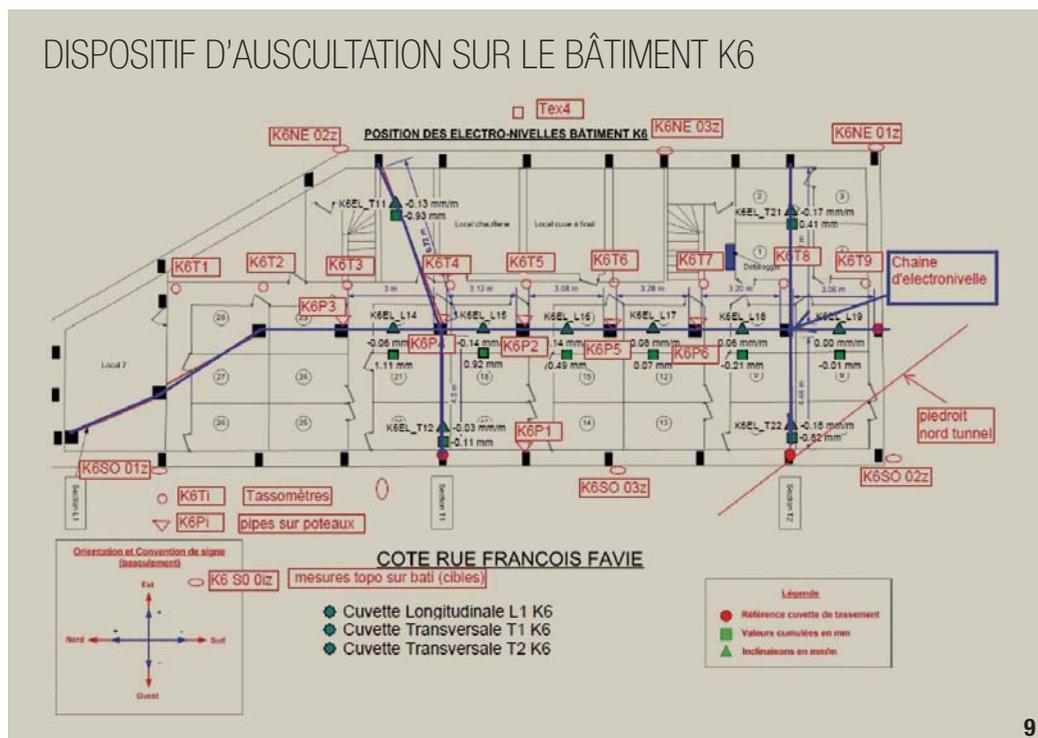
Le dispositif final se compose de 57 forages pseudo-horizontaux de 40 m en moyenne (jusqu'à 55 m) répartis en 3 lits situés entre 5 et 12 m de profondeur. Chaque forage est équipé de tubes métalliques à manchettes (2", soit 51 mm de diamètre) permettant d'injecter du coulis de ciment en tout point sous le bâti (figure 7).

Les tubes métalliques, plutôt que des tubes PVC classiquement utilisés ont été retenus car ils permettaient d'avoir une meilleure résistance aux multiples reprises d'injections sélectives à l'obturateur double ainsi qu'aux pressions générées lors des injections adjacentes et aux nettoyages sous haute pression. Le rôle de renforcement mécanique du matelas ainsi armé de trois nappes de tubes métallique a également été évoqué, bien que cet effet soit difficile à quantifier (photo 8).

Afin de limiter les tassements pendant la phase de mise en place des tubes d'injection, plusieurs méthodes de foration ont été envisagées : forage carotté ou destructif classique, forage avec outils perdus (méthode RTA), forage avec une machine *sonic drilling* (vibration à très haute fréquence d'un tube de 140 mm de diamètre équipé d'une couronne creuse destructurant le terrain par résonance). Pour tester cette dernière méthode encore peu utilisée en France, plusieurs essais ont été réalisés :

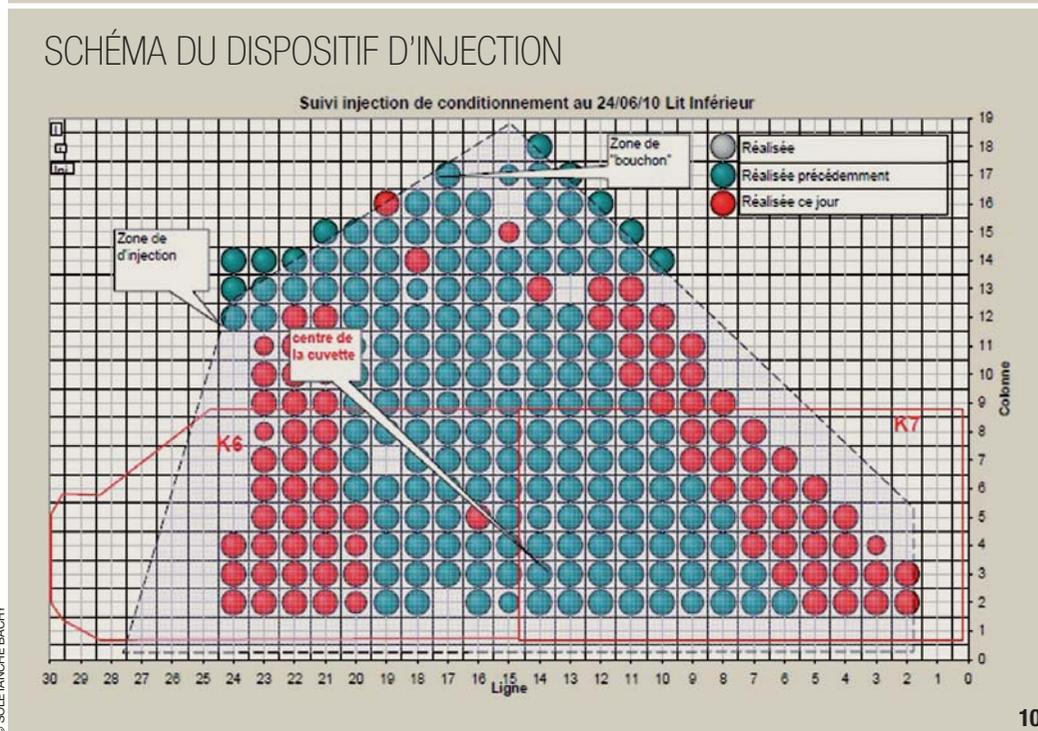
→ Forage destructif avec outil perdu pleine face sur 40 ml équipé en tube PVC ;

DISPOSITIF D'AUSCULTATION SUR LE BÂTIMENT K6



9

SCHÉMA DU DISPOSITIF D'INJECTION



10

→ Forage destructif avec outil type « couronne ouverte » sur 40 ml équipé en tube métallique ;

→ Forage destructif à sec avec 2 types d'outils (outil Fishtail, outil perdu pleine face) équipés en tube PVC. L'essai à sec a été interrompu à 7,72 m et prolongé jusqu'à 55 m avec de l'eau ;

→ Forage carotté à sec sur 40 ml équipé en tube PVC.

Ces 4 tests de forages ont permis de montrer que la méthode *sonic* était bien adaptée au contexte sensible et hétérogène du site. Les quatre forages ont pu atteindre leur objectif, soit 40 à 55 m de foration sans que l'on mesure des tassements significatifs sur le bâti (topo et électro-nivelles), tout en respectant les critères de déviation recherchés. Il a également été mis en évidence que :

→ La méthode *sonic* à sec ne fonctionne pas correctement dans ces terrains (un minimum d'eau est nécessaire, sinon on constate un échauffement trop important de la tête) ;

→ Les déviations mesurées par trajectométrie ont montré une bonne précision des forages, quelle que soit la méthode (de l'ordre de 0,5° à 0,6°, soit 35 à 40 cm sur 40 m).

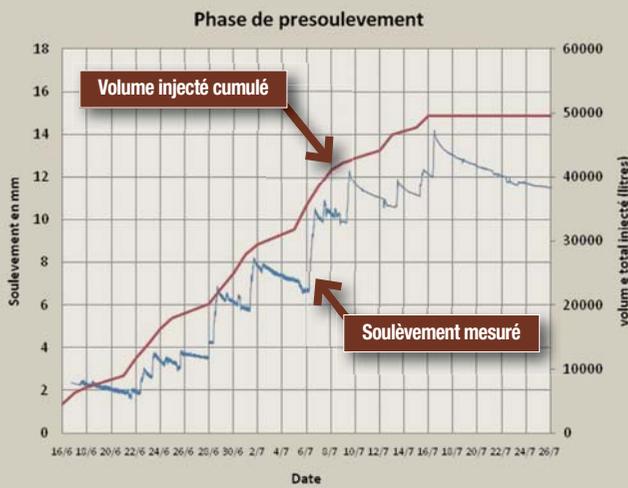
La méthode par forage *sonic drilling* destructif avec un outil perdu type couronne pleine face a été retenue : elle permettait de limiter l'apport d'eau lors du forage (19 m³ pour 40 ml au lieu de 75 à 100 m³ pour les forages RTA), une bonne maîtrise de la trajectoire, une compaction locale du terrain autour du tube et des vitesses d'avancement raisonnables et ce, sans provoquer de tassements lors du test.

DISPOSITIF D'AUSCULTATION

La réalisation des injections de compensation nécessite un système d'auscultation complexe et automatique permettant de suivre les mouvements du bâti très précisément et en temps réel. Le dispositif initialement mis en place a été largement renforcé pour aboutir à l'ensemble suivant (figure 9) :

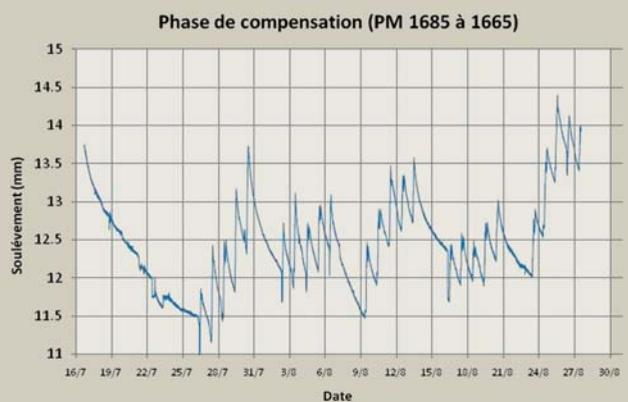
→ Un réseau de 36 électro-nivelles disposées dans les caves. Les électro-nivelles automatisées permettent une mesure très précise de l'inclinaison locale du bâti ; en les reliant entre elles pour former une chaîne, elles permettent de calculer les tassements différentiels longitudinaux et transversaux et les tassements absolus au droit des poteaux des bâtiments. Trois chaînes longitudinales d'électro-nivelles ont été formées (deux sous le K6 et une sous le K7). Le matériel permettait de réaliser une mesure toutes les 4 minutes, et

SOULÈVEMENT ET VOLUME INJECTÉ



11

COMPENSATION PENDANT LE CREUSEMENT SOUS BÂTI (SOULÈVEMENT RELATIF MESURÉ SUR ÉLECTRO-NIVELLE)



12

11- Soulèvement et volume injecté.

12- Compensation grouting pendant le creusement sous bâti (soulèvement relatif mesuré sur électro-nivelle).

11- Uplift and volume injected.

12- Compensation grouting during excavation under buildings (relative uplift measured on electronic level gauge).

un transfert immédiat sur la base de données Geoscope ;

→ Plus de cinquante cibles topographiques disposées sur les façades extérieures mesurées par quatre théodolites automatisés (fréquence maximale : 1 mesure toutes les 8 minutes) ;

→ Des tassomètres mis en place dans les caves mesurés manuellement ;

→ Des pipes de tassements (mesures topos classiques disposées sur les poteaux) ;

→ De 3 extensomètres en forage sur la rue Fabié ;

→ De jauges de contrainte sur les structures poteaux + poutres ;

→ De fissuromètres au droit des principales fissures recensées dans les appartements ;

→ Des mesures en galerie (convergences, extrusions du front) à partir d'un théodolite automatisé ;

→ Mise en place d'un extrusimètre au front.

L'ensemble des mesures (automatisée ou manuelles) était consultable par internet, sous forme de graphiques sur la base de donnée Geoscope mis en place par SolData.

PILOTAGE DES TRAVAUX - RETOUR D'EXPÉRIENCE

PHASE DE FORATION

La phase de foration pour la mise en place des tubes d'injection a permis de confirmer la bonne adéquation de la méthode *sonic drilling* et de tester la fiabilité et la précision du dispositif d'auscultation.

Il a d'abord été constaté :

→ Que les forages ne provoquaient pas de tassements supplémentaires ; au contraire, un léger soulèvement millimétrique du bâti a été enregistré en fin de phase de foration ;

→ Une très grande précision des électro-nivelles ;

→ Une bonne maîtrise de l'inclinaison des forages (déviations mesurées en moyenne inférieures au degré) ;

→ Un avancement tout à fait satisfaisant de la foration.

PHASE DE CONDITIONNEMENT

La mise en place des 57 forages avec des manchettes tous les 33 cm permettait de disposer d'un réseau de 297 cellules d'une surface de 2 m x 2 m. Chaque cellule disposait d'environ 10 points d'injections répartis sur les 3 lits (figure 10).

Les injections ont démarré par une phase dite de « conditionnement – pré-soulèvement ». Cette première phase poursuivait trois objectifs :

→ Tout d'abord, consolider et resserrer le terrain afin d'homogénéiser son comportement vis-à-vis des injections ;

→ Tester le dispositif et définir les quantités à injecter par manchette pour la phase de pré-soulèvement puis de compensation ;

→ Ensuite, réaliser un pré-soulèvement du bâti avant la reprise de l'excavation à partir du lit intermédiaire.

Le conditionnement a été d'abord essentiellement réalisé à partir du lit de forage supérieur puis inférieur.

Les injections par le lit médian ont été testées sur la fin de cette phase.

Cette phase de conditionnement a été réalisée en 28 jours (8 juin au 16 juillet 2010) ; les quantités injectées ont été d'abord de l'ordre de quelques centaines de litres par jour à partir d'un vingtain de manchettes (30 litres max. par manchette, avec une pression limitée à 10 bars), puis, compte tenu de la bonne réactivité du bâtiment sans

création de désordres complémentaires, le nombre de manchettes et le volume total injecté ont été progressivement augmentés, jusqu'à 3 900 litres par jour sur 130 manchettes.

Au total, 1 730 passes d'injection ont été réalisées, conduisant à la mise en place de 50 m³ de coulis de bentonite ciment.

Le dispositif de suivi, et plus particulièrement les chaînes d'électro-nivelles ont permis de mettre en évidence la bonne proportionnalité entre les volumes injectés et les soulèvements mesurés : on constate par exemple un soulèvement de 3,3 mm le 6/07 pour un volume injecté de 3 900 litres ; on constate également un phénomène de relaxation lié à la dissipation des pressions interstitielles, conduisant à un tassement lors des phases d'arrêt des injections pouvant atteindre quasiment 50 % du soulèvement (figure 11).

À la fin de ces travaux préparatoires, le pré-soulèvement a atteint 10 à 12 mm au maximum au centre de la cuvette de tassement. De même, cette phase a permis de réduire les pentes mesurées sur les façades extérieures : parallèlement aux façades, on constate une diminution significative, avec une valeur de la pente longitudinale passant de 1,3 ‰ à 1,1 ‰. Transversalement, les pentes sont restées globalement stables ; aucun mouvement significatif

en tunnel n'a été mesuré (ni convergence du soutènement, ni extrusion du front).

Cette phase a permis d'estimer le coefficient d'efficacité, coefficient correspondant au rapport volume injecté sur volume soulevé : les estimations ont permis de montrer que ce coefficient était de l'ordre de 5,5 à 6,6 pour le lit inférieur, 4,5 pour le lit médian et 5 pour le lit supérieur. Ces valeurs étaient conformes aux valeurs disponibles dans la bibliographie (généralement comprises entre 3 et 7).

À partir de ce coefficient d'efficacité, le volume de coulis nécessaire pour compenser le tassement lié au creusement du tunnel a été défini : il a été

estimé que pour compenser un tassement de l'ordre de 0,5 mm/j au centre de la cuvette, 50 cellules devaient être injectées (soit 1,5 m³).

PHASE DE COMPENSATION

Après ces étapes de préparation du dispositif, l'excavation a pu reprendre mi-juillet 2010 et les injections dites de « compensation » ont démarré.

La méthode consiste à injecter du coulis chaque jour de manière à créer des soulèvements permettant de compenser le tassement mesurés ou estimés la veille.

Ces injections sont donc réalisées de manière très ciblée sous certaines zones du bâti, à partir du lit de forages intermédiaires. Le programme d'injection de la journée est décidé de manière tripartite à l'occasion de réunions de pilotage entre le Bureau Veritas, le groupement d'entreprises et le maître d'œuvre.

Le creusement du tunnel a repris avec un rythme de l'ordre de 1 m/jour.

Le nombre de cellules injectées a été compris entre 40 et 70 manchettes par jour.

Le soulèvement journalier nécessaire pour compenser le tassement lié au creusement a été conforme aux prévisions établies en fin de phase de conditionnement : environ 1,2 mm de soulèvement étaient mesurés la journée.

Il était enregistré ensuite une relaxation sur 12 h de l'ordre de 0,3 à 0,5 mm. Pendant les arrêts plus longs (WE), la relaxation atteignait environ 1,5 mm.

Il a également été constaté une réactivité quasi-immédiate du bâti vis-à-vis des sollicitations du coulis : dès le début des injections, un soulèvement était mesuré sur les électro-nivelles, permettant de contrôler de manière très précise la compensation et d'adapter en permanence la localisation et les quantités de coulis injecté.

La figure 12 (soulèvement relatif calculé sur l'électro-nivelle L19 située au centre de la cuvette) permet de mettre en évidence l'effet de chaque injection journalière (soulèvement de l'ordre de 1,2 mm), suivi par une phase de relaxation débutant immédiatement après l'arrêt des injections.

Après plus de 20 m d'excavation sous les bâtiments et un tassement « compensé » estimé à 13 mm, les bâtis ont pu être maintenus en permanence dans leur position initiale avant reprise du creusement à plus ou moins 1 mm tout en respectant les seuils de tassements différentiels.

La phase de compensation a ensuite été maintenue pendant environ deux mois supplémentaires jusqu'à ce que le front du tunnel ait dépassé les bâtiments de plus de 40 m (jusqu'au PM1615). Ce maintien (avec des quantités injectées réduites petit à petit) a permis de limiter l'effet de relaxation (2 mm de tassement mesurés).

Après l'arrêt de la phase proprement dite de compensation par injection, le dispositif d'auscultation est resté opérationnel, afin de contrôler l'évolution des déformations.

L'ensemble du dispositif d'injection restait également opérationnel, afin de pouvoir intervenir immédiatement en cas d'évolution anormale des tassements.

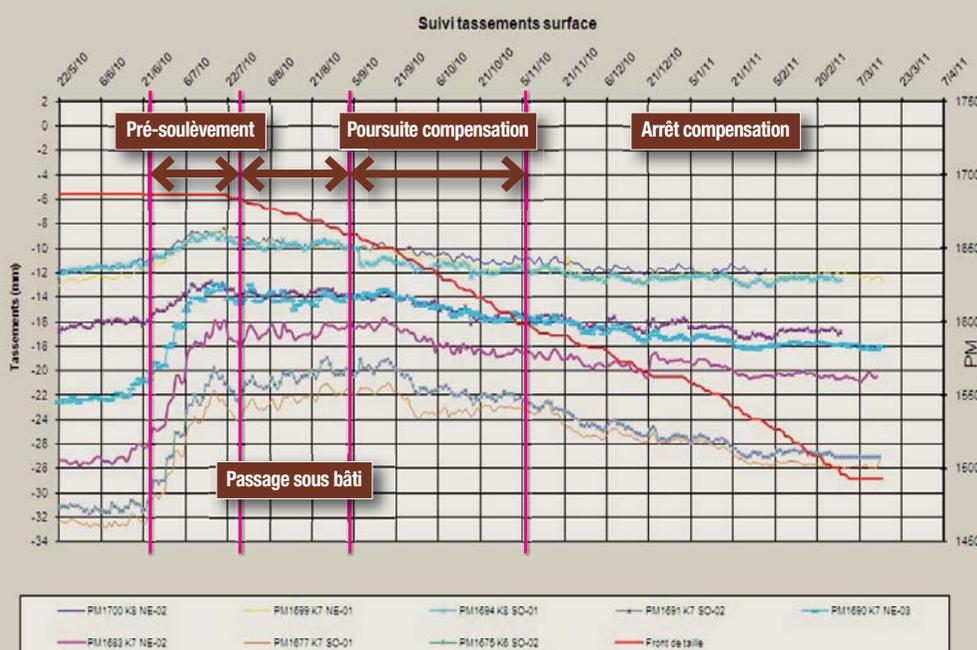
Cette phase de veille a été maintenue pendant toute la durée du creusement du rameau 8, rameau situé à proximité du bâti K6, mais il n'a pas été nécessaire de procéder à de nouvelles injections (tassement complémentaire millimétrique, lié à la poursuite de la relaxation du terrain et à la dissipation des surpressions provoquées par les injections).

Après stabilisation complète des tassements, il a été constaté un tassement maximal total provoqué par la reprise du creusement du tunnel de l'ordre de 6 mm, soit environ la moitié du soulèvement obtenu en phase de conditionnement (figure 13).

13- Suivi topographique du tassement en surface pendant et après reprise du creusement.

13- Topographic monitoring of surface subsidence during and after resumption of excavation.

SUIVI TOPOGRAPHIQUE DU TASSEMENT EN SURFACE PENDANT ET APRÈS REPRISSE DU CREUSEMENT



CONCLUSION

Pour une première application de la méthode en France, les injections de compensation ont parfaitement rempli leur rôle, en permettant la reprise du creusement sans provoquer de tassements significatifs et donc de désordres complémentaires sur les bâtis K6 et K7.

De nombreux enseignements ont pu être mis en évidence :

→ La réalisation de forages horizontaux par la méthode *sonic drilling* permet d'éviter tous tassements liés à

la foration et mise en place des tubes d'injection ;

→ L'hétérogénéité des formations géologiques sous les bâtiments n'est pas incompatible avec la mise en œuvre de la méthode qui passe par la réalisation d'un matelas de répartition efficace ;

→ La précision du dispositif d'auscultation (mesures topographiques automatisées et électro-nivelles) associée à un maillage dense des points d'injection permet de respecter des critères de tassements/soulèvement de l'ordre du millimètre. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Direction Régionale de l'Équipement PACA, Service Maîtrise d'ouvrage

ASSISTANTS AU MAÎTRE D'OUVRAGE : CETE Méditerranée, CETU, Véritas (suivi du bâti), Laboratoire ville de Toulon (suivi qualité eaux), Optia Méditerranée (contrôle topo), MS GC-TP (coordination SPS), AtmoPaca (suivi qualité air), Acouplus (suivi acoustique), CETE (Contrôles matériaux)

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Setec tpi, Terrasol

GROUPEMENT D'ENTREPRISES POUR LE GÉNIE CIVIL : Bouygues Travaux Publics, Soletanche Bachy France, Colas Midi Méditerranée, Screg Sud Est, sous-traitant auscultation SolData

ABSTRACT

**TOULON TUNNEL SOUTHERN TUBE
COMPENSATION CEMENT GROUTING
UNDER TWO BUILDINGS**

ALAIN GUILLLOUX, TERRASOL - HERVÉ LE BISSONNAIS, TERRASOL - ROBIN BETEND, SOLETANCHE BACHY - GILLES BOYER, SOLETANCHE BACHY TUNNELS

An unfavourable geological environment and surface deformation of the buildings due to excavation of the first tube are among the numerous difficulties of this Toulon Tunnel southern tube project, situated in a highly urbanised and complex environment. Solutions employed: a very rigid retaining structure, with reinforcement of the tunnel face by jet grouting columns and umbrella arch, and use of compensation grouting in places. □

**TÚNEL DE TOULON TUBO SUR
INYECCIONES DE COMPENSACIÓN
DEBAJO DE DOS EDIFICIOS**

ALAIN GUILLLOUX, TERRASOL - HERVÉ LE BISSONNAIS, TERRASOL - ROBIN BETEND, SOLETANCHE BACHY - GILLES BOYER, SOLETANCHE BACHY TUNNELS

Un contexto geológico desfavorable, diversas deformaciones de los edificios en superficie relacionadas con la excavación del primer tubo, etc. constituyen las principales dificultades de esta obra del túnel de Toulon tubo Sur, ubicado en un contexto ampliamente urbanizado y complejo. Las soluciones que se han puesto en obra son: una contención sumamente rígida, con refuerzo del frente mediante columnas de jet grouting y bóveda parabólica, así como el recurso en ciertos lugares a inyecciones de compensación. □

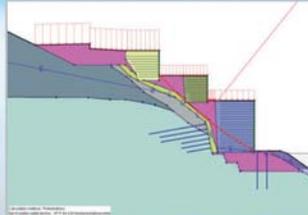
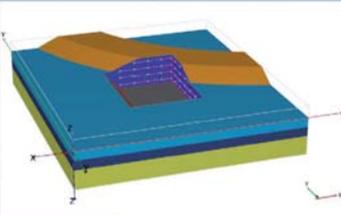


Complémentarité et synergie



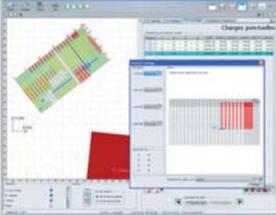
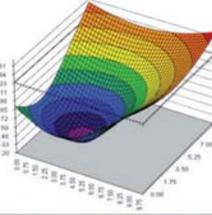
Ingénierie géotechnique

Conception
Maîtrise d'œuvre
Expertise



Logiciels géotechniques






Développement

Assistance technique
Formation

Une société du groupe  **setec**

TERRASOL recrute des ingénieurs géotechniciens

TERRASOL – Immeuble Central Seine - 42/52, quai de la Râpée – CS 71230 - 75583 Paris Cedex 12 - Tél : + 33.1.82.51.52.00 - Fax : + 33.1.82.51.52.99 - www.terrasol.com - Email : info@terrasol.com

TERRASOL RHONE-ALPES - Immeuble l'Orient - 10, place Charles Béraudier - 69428 Lyon Cedex 3 - Tél : + 33.4.27.85.49.35 - Fax : + 33.4.27.85.49.36 - www.terrasol.com - Email : lyon@terrasol.com