

Prolongement de la ligne 14 au Sud de Paris : Injections des anciennes carrières de Calcaire Grossier

Extension of Line 14 in the South of Paris – focus on Limestone quarries grouting

Nicolas BONFILS, *RATP, Fontenay-sous-Bois, France*

Anne BERGERE, *setec, Paris, France*

Marie COBLARD, *setec, Paris, France*

Francis LANQUETTE, *setec, Paris, France*

Benoît DOUSSAU de BAZIGNAN, *Spie Batignolles fondations, Paris, France*

Guillaume THOUVENIN, *Dodin Campenon Bernard, Chevilly la Rue, France*

Résumé

Considéré comme la colonne vertébrale du Grand Paris Express, le prolongement de la ligne 14 vers le Sud, sous maîtrise d'ouvrage RATP, connectera la station-atelier Olympiades existante à l'aéroport d'Orly. La mise en service est prévue pour les Jeux Olympiques de 2024. La réalisation des 14 km du tunnel est en cours avec un défi majeur : le passage du tunnelier Allison sous des carrières de Calcaire Grossier, sur une longueur de 1,6 km en sous-sol de la ville du Kremlin-Bicêtre.

L'injection préalable de ces carrières a donc fait l'objet d'une attention toute particulière lors des phases d'études et de travaux afin de prévenir les désordres en surface lors du passage du tunnelier. Elle consiste en un comblement des vides laissés en carrière afin de soutenir le ciel de carrière et ainsi limiter les remontées de déformations en surface. Le comblement est réalisé depuis la surface en voirie ou dans les domaines privés, sur bande de largeur variant de 20 à 30 m axée sur le tracé du tunnel.

Un suivi au jour le jour des diagraphies de forages permet de confirmer l'altimétrie, le nombre de niveaux et la quantité de vide, ainsi que l'état de stabilité des exploitations du Calcaire Grossier. Il permet de s'assurer d'un maintien d'une couverture suffisante avec le plancher des carrières lors du passage du tunnelier et la détection de points de fragilité existants (fontis, terrains décomprimés, ...) à traiter au cas par cas.

Abstract

Considered to be the backbone of the Grand Paris Express, the extension of line 14 to the South, under the RATP contracting authority, will connect the existing Olympiades workshop station to Orly airport. Commissioning is scheduled for the 2024 Olympic Games. The completion of the 14 km tunnel is underway with a major challenge: the passage of the Allison TBM under Coarse Limestone quarries, over a length of 1.6 km below-soil of the city of Kremlin-Bicêtre.

Particular attention was therefore paid to the prior injection of these quarries during the design and work phases in order to prevent damage to the surface during passage of the TBM. It consists of filling in the voids left in the quarry in order to support the quarry sky and thus limit the rise of deformations on the surface. Filling is carried out from the surface on the roads or in private areas, on a strip of width varying from 20 to 30 m focused on the route of the tunnel.

Day-to-day monitoring of borehole logs confirms the altimetry, the number of levels and the amount of void, as well as the state of stability of the Coarse Limestone quarries. It makes it possible to ensure that sufficient coverage is maintained with the quarry floor when passing the TBM and the detection of existing points of weakness (sinkholes, decompressed soil, etc.) to be treated on a case-by-case basis.

Prolongement de la ligne 14 au Sud de Paris : Injections des anciennes carrières de Calcaire Grossier

Extension of Line 14 in the South of Paris – focus on Limestone quarries grouting

Nicolas BONFILS, *RATP, Fontenay-sous-Bois, France*

Anne BERGERE, *setec, Paris, France*

Marie COBLARD, *setec, Paris, France*

Francis LANQUETTE, *setec, Paris, France*

Benoît DOUSSAU de BAZIGNAN, *Spie Batignolles fondations, Paris, France*

Guillaume THOUVENIN, *Dodin Campenon Bernard, Chevilly la Rue, France*

1 Introduction : le prolongement Sud de la ligne 14

Le projet du prolongement de la ligne 14 au Sud s'inscrit entre la station-atelier « Olympiades » et le futur SMR à Morangis, soit environ 14 km supplémentaires de tunnel, une tranchée couverte, 7 nouvelles gares (dont 5 sous maîtrise d'ouvrage RATP), et 12 ouvrages annexes.

Parmi les 7 gares desservies, 3 d'entre elles sont en correspondance avec des transports urbains, ferroviaires ou aériens, existants ou en projet. En particulier, la ligne 14 permettra de connecter l'aéroport d'Orly au centre de Paris en moins de 30 minutes.

Le tunnel est un ouvrage circulaire profond à 2 voies de 7,75 m de diamètre intérieur pour un diamètre excavé de 8,83 m, réalisé au tunnelier à pression de terre. Une des particularités de ce tunnel est la présence sur 1,6 km de son linéaire d'exploitations du Calcaire Grossier en carrières souterraines.

Le tracé concerné par la présence de carrières se situe sous la commune du Kremlin-Bicêtre, banlieue située à la périphérie Sud de Paris. La commune est composée d'ensembles d'immeubles de type R+5 à R+12, sous lesquels les carrières ont déjà été traitées pour la plupart par injection ou piliers maçonnés, et de quartiers pavillonnaires sillonnés de ruelles étroites sous lesquels aucun traitement n'a été réalisé.

Les emprises chantier pour réaliser les comblements de carrières depuis la surface sont donc très limitées. A ces contraintes s'ajoute une grande densité de réseaux enterrés parfois jusqu'à 5 m de profondeur.

2 Les carrières de Calcaire Grossier

2.1 Le bassin parisien, Sud de Paris

Le projet de la Ligne 14 Sud s'inscrit dans l'ensemble géologique régional du bassin de Paris, soit une succession de formations sédimentaires peu déformées par une activité tectonique en son sein très faible depuis sa formation, avec une structure d'ensemble relativement horizontale héritée des dépôts sédimentaires successifs qui le constituent.

La géologie du secteur concerné par la problématique carrières se caractérise par 2 zones principales dont les caractéristiques géologiques sont les suivantes :

- La plaine alluviale de la Bièvre : les formations géologiques de l'Eocène inférieur (Yprésien) sont présentes sous les terrains en place du Lutécien, et reposent sur la craie du Crétacé. Les différents faciès des formations Yprésiennes ne sont pas homogènes dans l'espace.
- Le versant entre Le Kremlin-Bicêtre et Villejuif : le pendage des formations géologiques est en direction du Sud-Est. Le versant correspond à une zone d'affleurement d'une majeure partie de la série stratigraphique (des Calcaires Grossiers du Lutécien aux Sables de Fontainebleau du Stampien).

Le Calcaire Grossier présent dans ces deux zones a été exploité dans les niveaux supérieur et moyen, le niveau inférieur étant souvent baigné par une nappe. Sur le tracé concerné, la profondeur moyenne du ciel de carrières est de 15 m et peut atteindre 40 m de profondeur dans le versant de Villejuif (Figure 1).

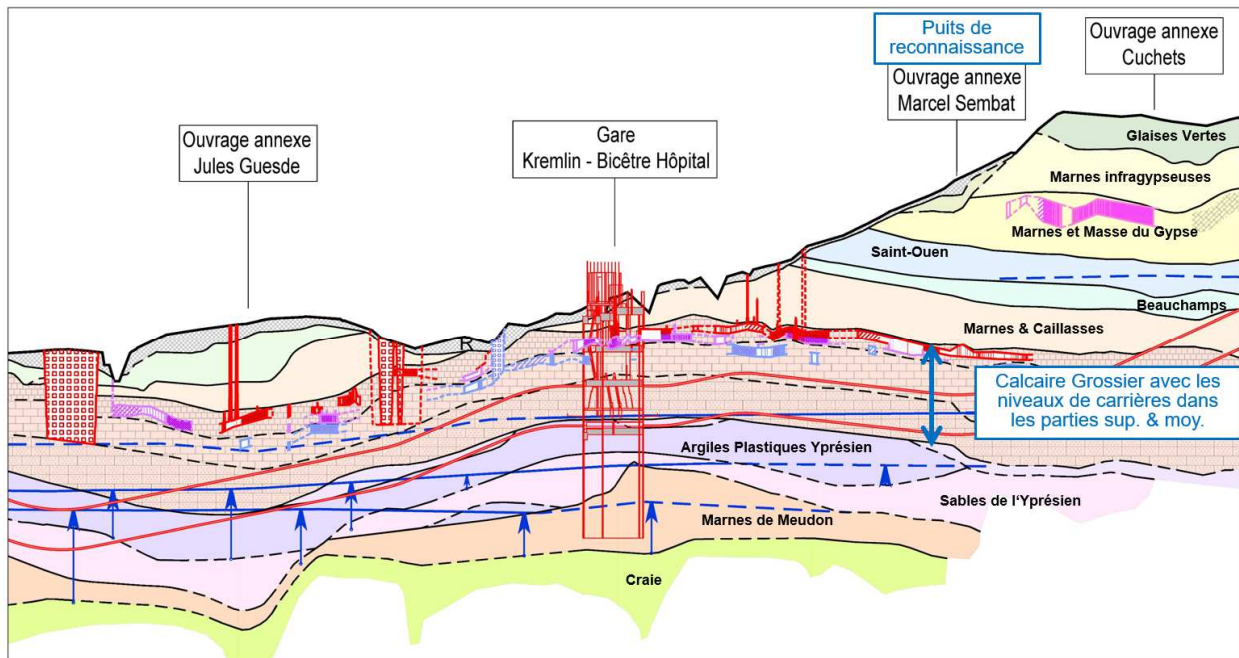


Figure 1. Extrait du profil en long concerné par la problématique carrières - représentation des 3 niveaux de carrières en rouge / bleu / violet (échelle 1H/10V)

2.2 Les carrières de Calcaire Grossier

Le type d'exploitation prédominant concerné par le tracé du tunnel de la L14S est celui par « hagues et bourrages ».

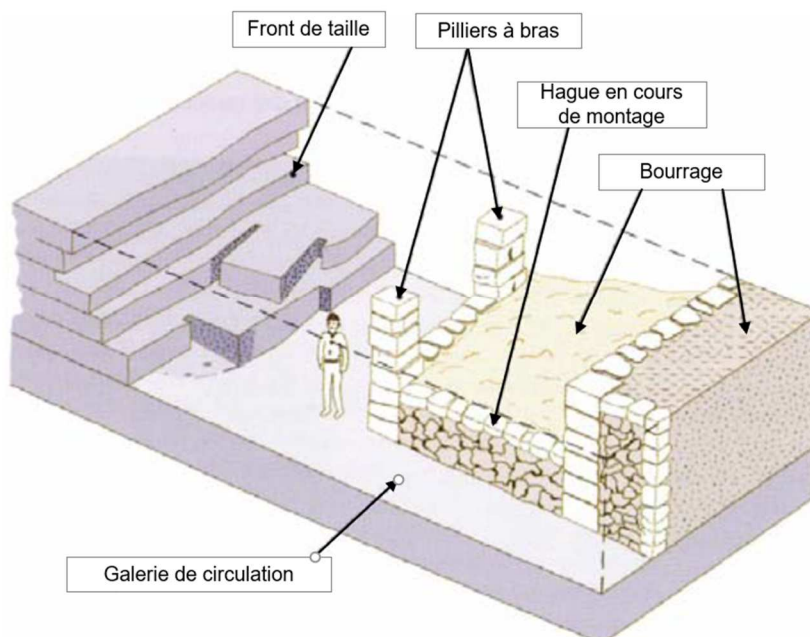


Figure 2. Schéma de principe de l'exploitation par hague et bourrage (ARBIZZI & Co 2006)

Afin de rentabiliser les exploitations sans laisser de masse en place, l'excavation est faite sur toute la masse et les soutènements se composent de piliers à bras (empilement à bras d'homme de blocs non utilisés) et hagues (murs en pierres sèches), derrière lesquelles sont entassés les déchets d'exploitation et les bancs médiocres (bourrages), voir Figure 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** La situation actuelle est celle qui régnait au moment de l'arrêt d'exploitation :

- au niveau des fronts de masse et galeries laissées vides : hauteur de carrière de 1,5 à 2,0 m en général avec présence de piliers à bras et absence de bourrage ;
- en arrière du front, présence de bourrage (remblaiement avec les déchets d'exploitation : sables, calcaire et blocs).

Ce mode d'exploitation provoque un affaissement généralisé du toit des calcaires, qui vient progressivement se poser sur le bourrage. Il en résulte les aléas géotechniques suivants :

- un affaissement du ciel de carrière dans les galeries laissées vides pouvant se fracturer, voir s'effondrer créant un ciel tombé ou fontis ;
- le bourrage disposé sans aucune rigueur, peut être en contact et reprendre en charge le ciel de carrières. Il peut également subsister un espace vide entre le bourrage et le toit du Calcaire Grossier, reconnu en moyenne à 10 cm d'épaisseur.
- cette variation de hauteur provoque une flexion assez intense de l'horizon au-dessus des carrières qui peut provoquer une altération des caractéristiques géotechniques dans l'horizon des Marnes et Caillasses. On parle alors de décompression des Marnes et Caillasses.

L'excavation du tunnel sous les niveaux de carrières induit des tassements du plancher de carrières et des vibrations. La combinaison de ces deux phénomènes peut conduire à une instabilité des piliers assurant la stabilité du ciel de carrières et ainsi à la création d'un fontis, d'un effondrement du toit ou dans une moindre mesure un tassement important en surface. Le risque est alors caractérisé par des désordres sur les équipements de surface (bâtis, infrastructures, réseaux, ...).

2.3 Un outil de travail : les cartes de l'Inspection Générale des Carrières

L'Inspection Générale des Carrières (IGC) est un organisme public en charge de la gestion des risques liés aux anciennes carrières et à la dissolution du gypse à Paris et dans la plupart des communes de la petite couronne.

L'IGC a été créée par Louis XVI (1777) à la suite d'une série d'effondrements importants dans Paris. Ce service est chargé de recenser et de cartographier les anciennes carrières, de surveiller et d'émettre un avis sur chaque demande de permis de construire située sur une zone de carrière dans Paris.

Fort de son retour d'expérience, l'IGC a rédigé une série de notices qui définissent les règles de l'art pour consolider les carrières selon les différentes méthodes (consolidation à pied d'œuvre ou par injections).

Les cartes produites par l'IGC constituent une source d'information relativement fiable et précise sur l'état du sous-sol anciennement exploité de la région parisienne :

- localisation des zones de carrière (souterraines, à ciel ouvert) – précision à 2-3 m près en plan ;
- nombre de niveaux exploités (jusqu'à 3 dans les Calcaires et 2 dans les niveaux Gypseux) ;
- mode d'exploitation (hagues et bourrages, avec galeries et zones remblayées, puits d'accès...) et consolidations mises en place (piliers maçonnés, injections depuis la surface...) ;
- état des carrières, incidents apparus en surface (fontis, tassements...).

Les planches doivent être lues comme des cartes en 3D avec les différents niveaux d'exploitation qui sont représentés par plusieurs calques superposés et s'accompagnent de coupes, stratigraphies, et autres annotations (cf. Figure 3).



Figure 3. Exemple de carte IGC avec 3 niveaux de carrière au Kremlin Bicêtre ; photo de galerie dans cette même zone.

Les cartes publiées par l'IGC ne sont pas toujours très récentes et sont donc en partie incomplètes. Elles ont par ailleurs parfois été bâties initialement par le récolement d'informations peu fiables ou contradictoires, rendant peu lisibles certaines zones.

Les **zones « blanches »** sur les cartes sont à considérer comme des zones non renseignées et non comme des zones sans carrière. En effet, il est possible de rencontrer dans ces zones des carrières illégales, des exploitations non répertoriées ou inaccessibles aujourd'hui. Ainsi, il est possible de rencontrer des carrières alors que celles-ci ne sont pas indiquées sur les cartes.

3 Etudes de conception du passage du tunnelier sous les carrières

3.1 Les tracés envisagés

3.1.1 Cas de figure envisagés

En phase d'étude d'avant-projet, plusieurs scénarii ont été envisagés :

- le scenario de base consistait en un tracé au plus court entre les différents ouvrages de la ligne et imposant un passage sous les carrières dans la vallée de la Bièvre puis une traversée et un passage au-dessus lors de la remontée dans le versant de la butte de Villejuif ;
- le scenario variante permettait d'éviter la traversée des carrières lors de la remontée de la butte de Villejuif, le tracé restant ainsi sous les carrières tant qu'elles étaient suspectées.

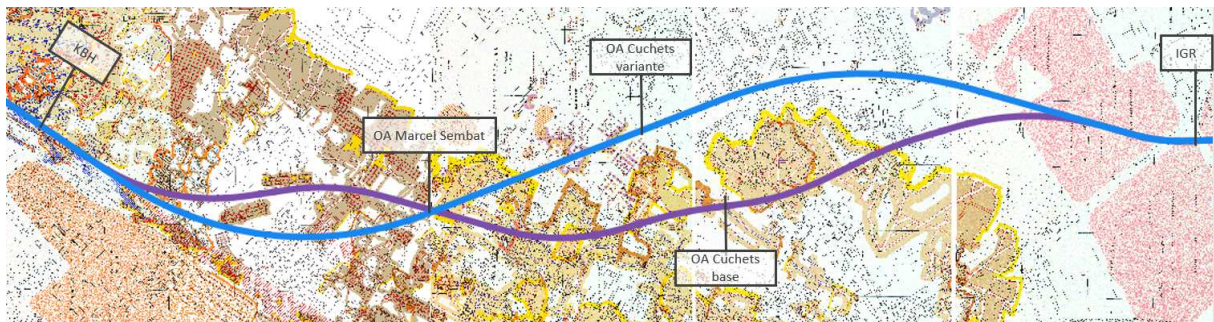


Figure 4 : Implantation du scénario de base (en violet) et du scénario variante (en bleu) sur fond de carte IGR - les zones orangées et jaune représentent les zones exploitées

Une campagne de reconnaissances avec une forte densité de sondages (1 forage tous les 70 m) a été nécessaire pour s'assurer de l'absence de carrières sur le tracé variante lors de la remontée de la butte de Villejuif. Ces sondages ont permis de valider l'absence de carrières dans la zone de remontée du tunnelier.

3.1.2 Solution retenue

La solution variante, plus simple techniquement, permet une meilleure maîtrise des risques, des coûts et des délais. Elle a ainsi été retenue à l'issue des études d'avant-projet et de la campagne de reconnaissances.

Le profil en long du tunnel s'inscrit sous les carrières sur un linéaire de 1,6 km avec une couverture minimale de 3 m correspondant à une couverture de 2 m sous le plancher et à une sécurité de 1 m liée à l'incertitude de l'altimétrie des carrières, la cote basse supposée dans le projet correspondant à l'hypothèse de la présence du 3ème niveau inférieur d'exploitation sur tout le tracé, de manière sécuritaire.

3.1.3 Puits de reconnaissances

Un puits d'essais au niveau du futur ouvrage annexe Marcel Sembat (cf. Figure 1) a été réalisé en parallèle des études de projet. Son objectif principal était de tester la qualité des traitements des carrières par injection depuis la surface.

Pour cela, ont été réalisés :

- des injections de barrage, comblement, clavage et traitement des remblais de bourrage et Marnes et Caillasses, via des forages inclinés entre 10 et 20°, au travers desquels une galerie en traditionnel a été excavée pour reconnaissance des injections après travaux ;
- un plot d'injection de barrage via des forages à 45° dans une galerie visitable ;
- une galerie d'accès aux carrières existantes ayant permis le constat à pied d'œuvre de l'état des carrières dans la zone du puits d'essais et du résultat du plot d'essais d'injection à 45°.

Ces travaux ont notamment permis de valider les procédures d'injections et de vérifier la faisabilité des injections à 45° avec une faible déviation des forages (de l'ordre de 1%).

3.2 Modélisations numériques

3.2.1 Les critères de dimensionnement

La stabilité de ces carrières parfois dans un état critique doit être assurée avec les dispositions qu'il est raisonnablement possible de mettre en œuvre. L'objectif des injections de remplissage des carrières est d'éviter l'effondrement du toit. Ainsi, le but recherché est de remplir les vides et non d'améliorer les caractéristiques géomécaniques de l'ensemble des niveaux de carrières.

Les modélisations numériques ont alors permis de déterminer la largeur de la bande de terrain traité sur la base des critères suivants :

- tassement maximal du plancher de carrière en bordure de la bande traitée inférieur à 10 mm ;
- tassement différentiel du plancher de carrière en bordure de la bande traitée inférieur 0,7 ‰.

Ces critères sont basés sur des retours d'expérience, et sur des modélisations aux éléments finis.

3.2.2 Description du modèle réalisé

Le tracé du tunnel alterne entre :

- Un creusement plein dans le Calcaire Grossier, roche tendre dont les bonnes caractéristiques permettent de limiter fortement les déformations du sol autour de l'excavation ;

- Un creusement plus profond que les carrières, dans une configuration géologique plus défavorable aux déformations, de front mixte entre le Calcaire Grossier et les Argiles Plastiques, voire plein dans les Argiles Plastiques.

Une modélisation 3D aux éléments finis du passage du tunnelier a été réalisée pour estimer les déformations du plancher de carrière lors de l'excavation selon les 3 types de front géologique (plein dans le Calcaire Grossier avec une couverture minimale de 3 m par rapport au plancher des carrières, mixte entre le Calcaire Grossier et les Argiles Plastiques, plein dans les Argiles Plastiques).

Il a été cherché à déterminer quelle configuration induisait le moins d'instabilités sur le plancher des carrières :

- une couverture plus importante mais un front tout ou en partie dans les Argiles Plastiques déformables ;
- une couverture réduite donc plus risquée vis-à-vis de la présence de carrière mais un front d'excavation dans de bons matériaux.

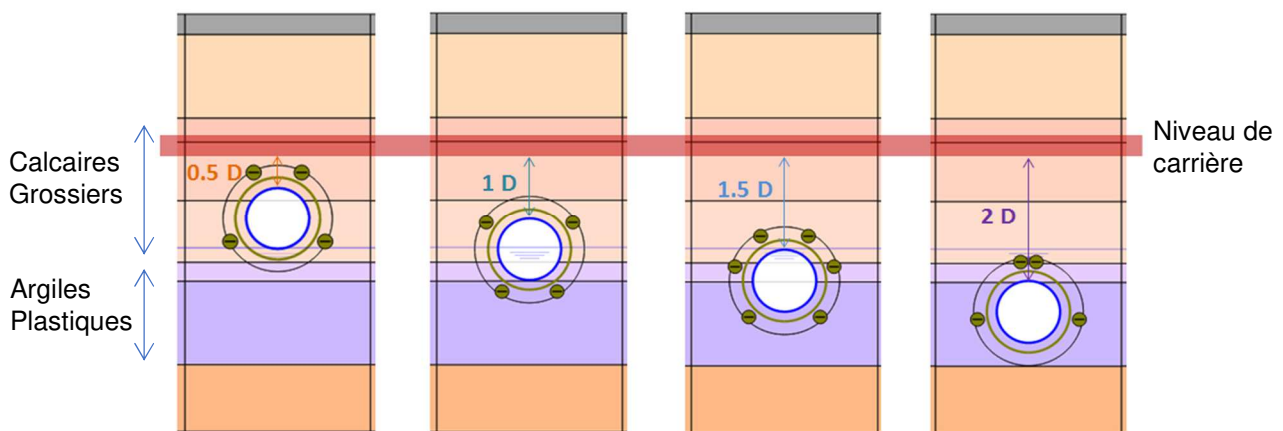


Figure 5. Cas de figures de la modélisation réalisée

Le modèle en 3D a également permis d'appréhender les contraintes dans les piliers à bras, principal soutènement du ciel de carrière. Pour cela, deux types de modélisation des piliers ont été réalisés : le premier avec des éléments volumiques et le second avec des éléments poutres. Les deux modèles ont montré des résultats similaires (cf. Figure 6).

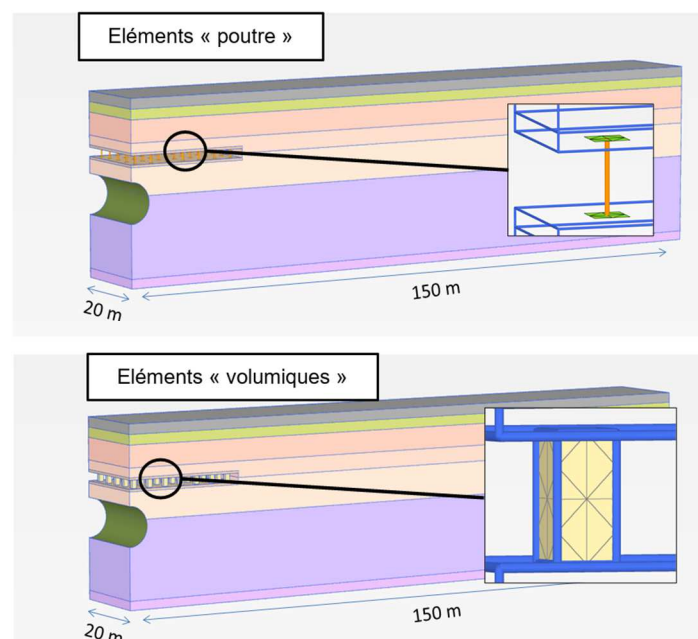


Figure 6: Illustration du modèle 3D

Des modélisations 2D, avec des éléments poutres pour représenter les piliers à bras, ont été étalonnées sur ces modèles 3D afin d'étendre l'étude à l'ensemble des différentes configurations de couverture totale et de bâti en surface et d'évaluer les pressions de confinement nécessaires pour limiter les déformations du plancher de la carrière.

3.2.3 Résultats

Les résultats ont mis en évidence les résultats suivants (cf. Figure 7 et Figure 8) :

- lorsque le tunnelier est dans les formations de l'Yprésien argileux, les tassements absolus sont plus importants, bien que la couverture soit plus grande, suite à la plastification des Argiles Plastiques, par contre les tassements différentiels sont plus faibles ;
- lorsque le tunnelier est en front plein dans les CG : les tassements sont plus faibles en valeur absolue mais plus forts en différentiels ;
- la réduction de la couverture du tunnel réduit la largeur de la cuvette de tassement et augmente en valeur absolue les tassements différentiels.

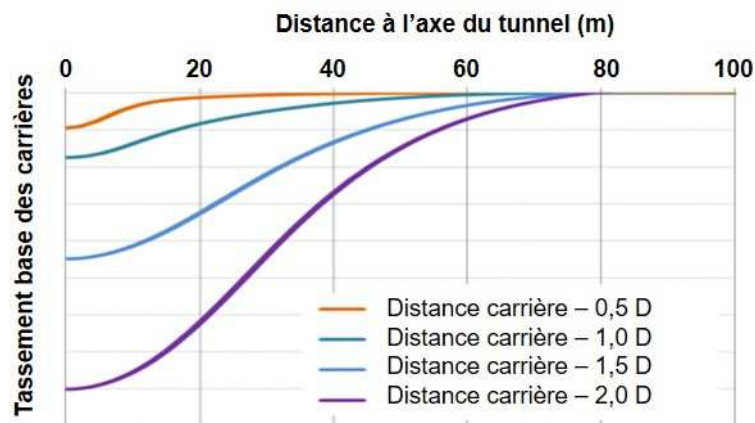


Figure 7. Courbes de tassement des différents cas de figure présentés Figure 5

Les Argiles Plastiques présentent des caractéristiques mécaniques relativement faibles et la plastification autour du tunnel devient importante lorsque le front descend dans ces argiles, augmentant ainsi considérablement les déformations au niveau des carrières.

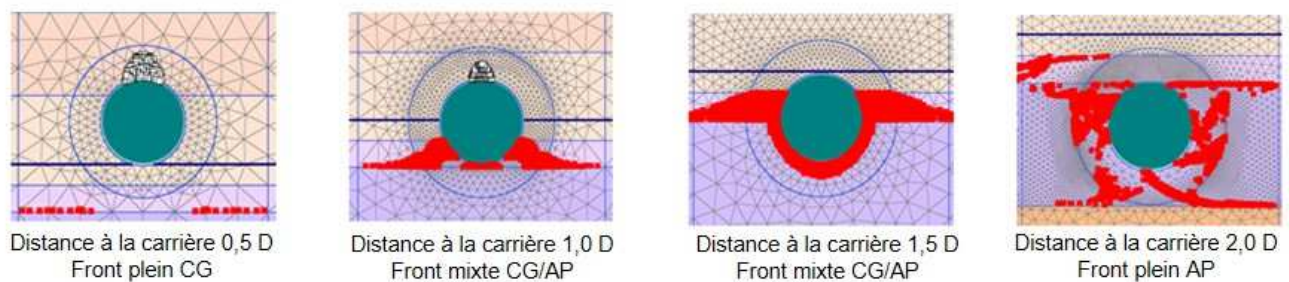


Figure 8. Critère de plastification des différents cas de figure présentés Figure 5

3.2.4 Mise en application de ces résultats sur le projet

Une analyse de risque a été menée pour compléter cette modélisation, il en a été déduit les principes suivants :

- il est nécessaire de venir combler les vides de carrières afin de confiner les piliers en place et d'éviter leur déstabilisation au passage du tunnelier ;
- combler les vides de carrières permet de limiter les remontées de fontis et les affaissements ;

- une largeur minimale de 20 m (soit 10 m de part et d'autre de l'axe du tunnel) est à combler. Cette largeur est augmentée en fonction du pourcentage du front dans les Argiles Plastiques, pour atteindre au maximum 30 m.

A l'issue des modélisations, les travaux d'injection des carrières prescrits sont les suivants :

- comblement systématique à minima d'une largeur de 20 m axée sur le tunnel ;
- comblement dès que le tassement calculé par modélisation est supérieur à 10 mm en absolu ou 0,7 mm/m en différentiel au niveau du plancher de carrières, ce qui donne sur le projet des bandes d'injection de 20 à 30 m de largeur axées sur le tunnel.

3.3 Méthodologie des injections retenue

L'objectif des injections est de combler le vide sous le ciel de carrières pour confiner les piliers et appuyer le ciel, afin de limiter les mouvements de terrain en surface à des amplitudes admissibles. La solution d'injection retenue est la réalisation d'injection de comblement gravitaire depuis la surface.

Les contraintes en termes de délais et les conditions d'accès ne permettent pas la réalisation de comblement à pied d'œuvre. Par ailleurs, l'ensemble du linéaire de carrières à combler n'a pas pu être visité, leur état est donc mal connu. Ce manque de connaissance ne permet pas d'envisager des comblements à pied d'œuvre pour des raisons de sécurité.

La méthode de comblement consiste donc en une injection globale unitaire d'un coulis de bentonite-ciment via des forages réalisés depuis la surface et inclinés entre 0 et 45° en fonction de l'emprise en surface. Ces injections sont complétées par des injections répétitives et sélectives sous pression en cas de rencontre de fontis ou de terrain décomprimé (Marnes et Caillasses particulièrement).

Des bâtis rencontrés par le tracé présentent un traitement des carrières réalisé préalablement (lors de la construction ou de la rénovation du bâti). Trois types de traitement sont rencontrés sur le tracé :

- fondations sur piliers maçonnés : afin de ne pas déstabiliser les piliers par la réalisation de forage et d'injection, aucun traitement supplémentaire n'est réalisé sous ces bâtis ;
- fondations profondes de type pieux : pour réaliser ce type de fondation, les carrières ont déjà été traitées, aucun traitement complémentaire n'est réalisé ;
- fondations superficielles sur carrières comblées : des sondages destructifs ont été réalisés pour confirmer le bon état des comblements, en fonction des résultats un traitement spécifique a été préconisé au cas par cas.

Pour contrôler la qualité des comblements réalisés, un forage destructif tous les 10 forages d'injections est réalisé un mois minimum après la fin des travaux.

4 La maîtrise du foncier

Le projet du prolongement de la ligne 14 à Orly fait partie intégrante du Réseau Grand Paris Express (RGPE). Il s'inscrit dans trois départements (Paris, Le Val-de-Marne et l'Essonne) et concerne onze villes sur le plan foncier. Dès la fin des études préliminaires, avec la Société du Grand Paris, qui a conservé dans ses prérogatives la maîtrise foncière, des démarches ont été initiées auprès des services de l'état pour mettre en œuvre un process robuste et des outils pour maîtriser le foncier nécessaire au projet. L'objectif était d'avoir très en amont un ensemble d'études stabilisé, notamment le tracé et l'implantation des ouvrages.

Pour lever les risques de maîtrise du périmètre foncier nécessaire au projet, la RATP a pris l'option d'élargir la bande foncière du tracé du prolongement. Cette approche a donné de la souplesse dans le calage fin du tracé lors des études de conception sans risque administratif lié à l'instruction parcellaire.

La Déclaration d'Utilité Publique délivrée dès l'été 2016, intégrant ce périmètre élargi, a permis d'appréhender sereinement les enjeux fonciers, notamment pour le traitement des carrières en interface avec le tracé de la ligne 14 sur la commune du Kremlin-Bicêtre.

La problématique des carrières a été très rapidement identifiée dans l'analyse de risques comme un des points clés sur le chemin critique du planning du projet.

En complément des études classiques de conception, dès la phase AVP, la Maitrise d'Ouvrage RATP a demandé à la MOE de produire des études de faisabilité opérationnelle d'un niveau technique proche d'une étude d'exécution. L'objectif était de lever les incertitudes en phase travaux.

Par ailleurs, ces études ont permis d'appréhender les méthodes d'exécution les plus adaptées pour réaliser les travaux de comblement des carrières. A titre d'exemple, sur les 14 zones traitées, la méthode d'intervention a été adaptée, entre traitement à pied d'œuvre et comblement depuis la surface.

Sur la base de ces études avancées, la RATP a pu rencontrer en phase projet les cinq cents propriétaires dont les parcelles étaient impactées par les travaux de comblement de carrières. Deux catégories de parcelles ont été distinguées : celles accueillant les ouvrages et les volumes de carrières comblés, et celles nécessaires pour la gestion logistique des chantiers. La première catégorie a fait l'objet d'une acquisition « notariée », la deuxième d'une convention d'occupation temporaire avec son propriétaire.

Privilégier une démarche amiable avec chaque propriétaire plutôt que de faire usage du droit garanti par la DUP a permis de construire l'acceptabilité du projet et des travaux par ces propriétaires.

Confronté à des occupations de terrains de longues durées, des mesures ont été mises en œuvre pour compenser la perte de jouissance des terrains occupés et des stationnements privés ou publics neutralisés durant les travaux.

L'identification très en amont des parcelles nécessaires à la logistique des travaux, a permis également d'appréhender les mesures d'atténuation des nuisances (bruits, poussières, travaux de nuits ou de jours) à mettre en œuvre par contractualisation dans les marchés de travaux.

Construire un métro en milieu urbain dense, sous des horizons d'anciennes exploitations de carrières, nécessite de prendre conscience, dès l'origine du projet, que la maîtrise foncière est un défi tout aussi important que la technique pour le rendez-vous des JO 2024 à Paris.

5 Retours d'expérience sur la phase travaux

Les injections des carrières du Calcaire Grossier de la L14S concernent au total une bande de 1,6 km sur 20 à 30 m de large, divisée en 14 zones de travail en fonction des emprises disponibles.

Les contraintes induites par ces travaux en site urbain dense sont nombreuses :

- emprises réduites et phasées ;
- circulation piéton et véhicule entre les emprises avec maintien des gabarits de passage ;
- maintien des accès aux riverains ;
- présence de nombreux réseaux ;
- limitation des nuisances bruits et poussières.

5.1 Etudes d'exécution

Si le marché impose d'installer les engins de forage sur des emprises prédéfinies en amont, il reste à l'Entreprise d'établir les études d'exécution qui définiront précisément les plans de tirs en fonction des emprises, des réseaux identifiés et des relevés géotechniques et topographiques.

Les enquêtes Bâti ont permis d'établir des plans précis de la position des caves, parkings et des fondations. Ces données ont été intégrées aux plans de tir.

Avant de commencer les travaux, une longue phase d'étude d'exécution a été nécessaire pour mener à bien le chantier. Ainsi, l'Entreprise a procédé à un levé précis de l'ensemble des rues et avoisinants des emprises, à une analyse poussée des DICT et à l'étude des informations disponibles sur la position des carrières. Ces éléments ont permis d'établir des plans de tirs complexes, comprenant des forages inclinés jusqu'à près de 45°, des longueurs atteignant 65 mètres et des directions systématiquement différentes avec une faible déviation des forages de l'ordre de 1% testée lors des travaux du puits de reconnaissances et constatées lors d'un plot d'essai en début de chantier. Par ailleurs, ces forages sont

réalisés depuis des emprises réduites ne permettant d'accueillir que des foreuses de petits gabarits (environ 8 tonnes).

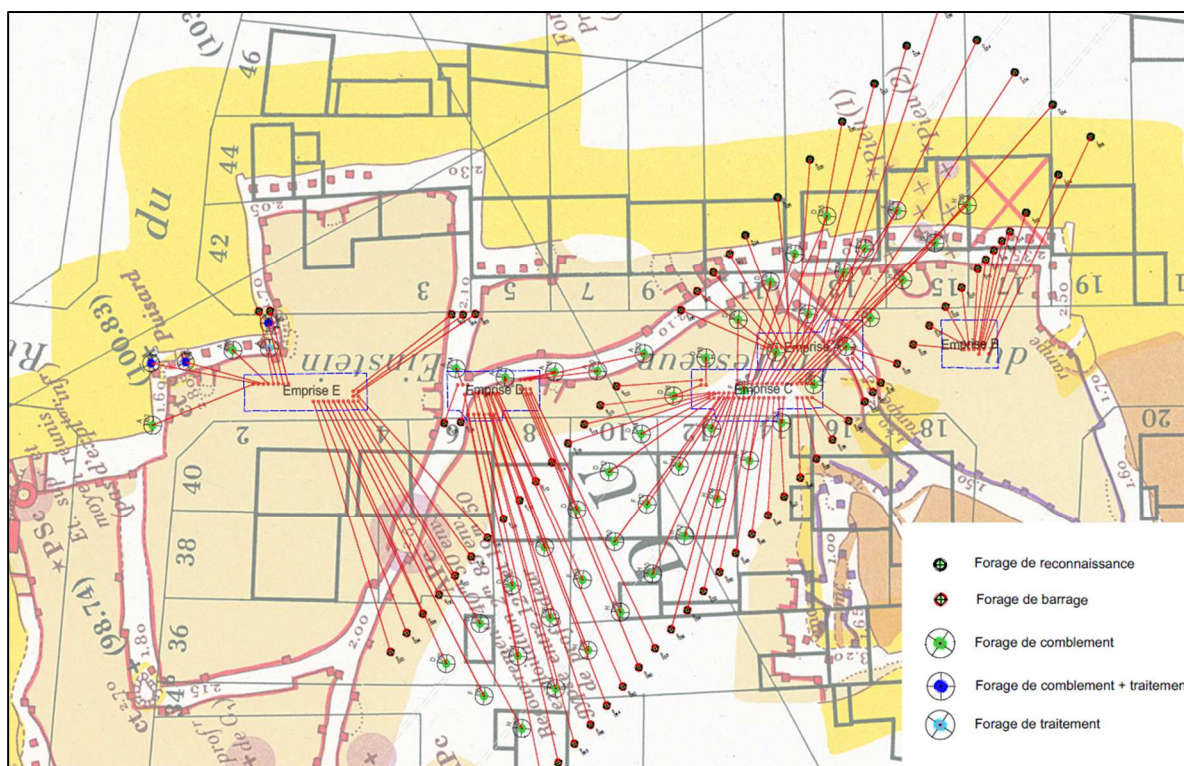


Figure 8a. Extrait de plan de tir de la zone 1 (3070 ml de forage de barrage / 2 521 ml de forage de comblement / 50 ml de forage de traitement ; diamètre de forage 180 mm)

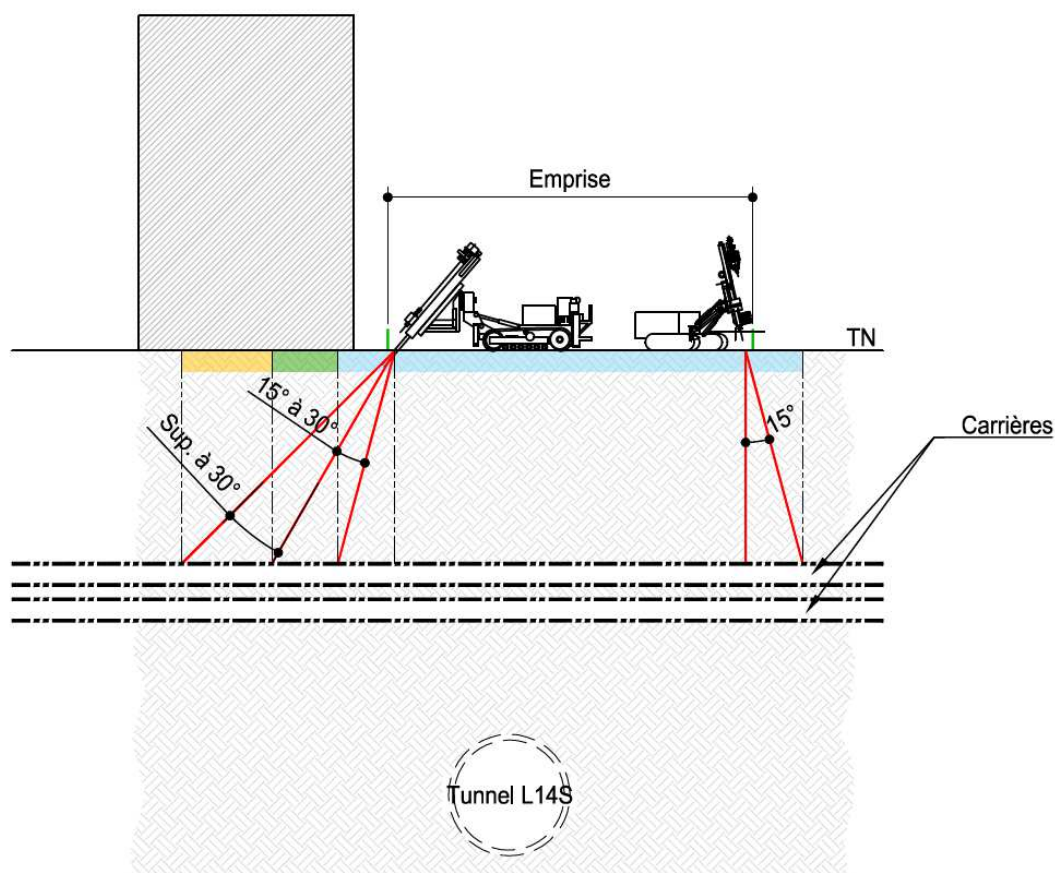


Figure 8b. Coupe de principe de la réalisation des injections de comblement des carrières

De plus, les espacements entre les forages et leur numérotation permettent une adaptation du plan de tir (notamment au travers de l'ajout de forages) en cas de découverte d'anomalie, de type fontis, puits ou décompressions. Les plans de tirs ont donc régulièrement fait l'objet en phase travaux d'adaptations en fonction de la position réelle des réseaux et des anomalies découvertes durant les forages.

L'ensemble des forages a été approfondi de manière à reconnaître la présence d'éventuels niveaux inférieurs de carrière non reconnus en étude. Certains forages situés autour du tunnel ont également été prolongés jusqu'à la base du Calcaire Grossier pour reconnaître la présence de Karsts.

5.2 Phase de préparation

Les travaux ont débuté en juin 2018 par un plot d'essai pour s'assurer de l'injectabilité des coulis prévus pour le comblement gravitaire avec des forages inclinés à 45°, angle de forage maximal imposé par les différentes zones de tirs. Après contrôle en carrière, les formulations de coulis ont été validées par la Maitrise d'Œuvre et le coulis frais a été caractérisé, aussi bien au niveau de sa densité que de sa viscosité. Cette étape a permis de réaliser un coulis de qualité et de composition constantes durant tous les travaux de comblement.

La première difficulté du chantier est d'ordonnancer les différentes zones en fonction des contraintes de site. Afin d'optimiser les moyens matériels, les centrales et équipements lourds demandant des emprises importantes sont installés de manière à pouvoir traiter plusieurs zones en parallèle. Il est donc nécessaire de s'assurer que les deux centrales mises en œuvre pouvaient produire du coulis en continu afin d'alimenter six différentes emprises en simultanée.

5.3 Phase de travaux

La première étape des travaux est la réalisation de fouilles de reconnaissance des réseaux de surface. En effet, la réalisation des forages depuis des trottoirs encombrés de réseaux nécessite de mener une campagne de reconnaissance précise des réseaux afin d'obtenir une vision juste de leur position (en plan et en altimétrie). Connaître leur implantation réelle limite au maximum le risque de forer au travers d'une canalisation ou d'un fourreau.

Ces fouilles sont réalisées à l'aide d'une aspiratrice à terre, moyen de terrassement doux fortement recommandé pour les travaux à proximité des réseaux. Cette machine est particulièrement adaptée, notamment lorsque la densité des réseaux est importante.

Après ouverture des fouilles, des tubes PVC sont mis en place et réglés selon un azimuth et un angle de tir permettant à l'opérateur de viser les carrières et de positionner son outil de forage en dehors des réseaux.



Figure 9. Fouille de reconnaissance et réservations en tube PVC pour réalisation de forages

Lors de cette première étape, les plans de tir font l'objet de mises à jour en fonction des positions réelles des réseaux.

Pour limiter les nuisances liées au chantier, les forages sont réalisés à l'eau, ce qui permet de réduire les dégagements de poussières. Les paramètres machine (Vitesse Instantanée de forage, Couple de Rotation, Pression de Poussée, Pression de retenue, Pression d'injection de l'eau de forage) des foreuses sont enregistrés en continu. La lecture des graphiques (cf. figure 10) permet, selon les machines, de vérifier la position des carrières et la présence d'éventuels fontis/décompressions des terrains, non reconnus en phase études.

Ces enregistrements de paramètres permettent ainsi d'ajuster le choix et le positionnement des équipements : tubes crépinés sur la hauteur des carrières pour le remplissage des vides résiduels, tubes à manchettes en cas de présence de décompressions, de puits ou de fontis pour le traitement sous pression du terrain.

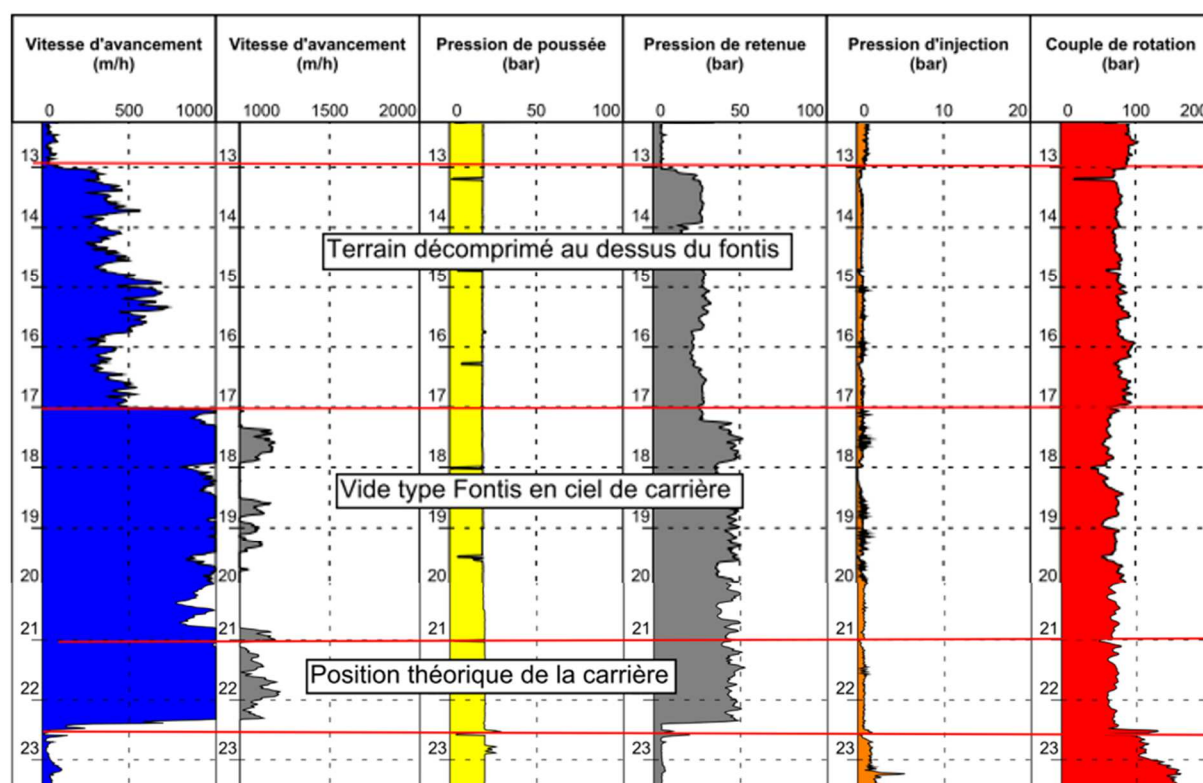


Figure 10. Exemple d'enregistrement de paramètres présentant une anomalie de type fontis

Nous distinguons 2 phases de traitement : les injections de barrage périmétrique avec un coulis spécifique, moins fluide, qui permet de remplir les carrières au droit du tunnel, puis vient le coulis de comblement.

Lors du forage en barrage nous injectons 4 m³ par jour et par emprise. Sur certaines zones cela peut prendre jusqu'à 10 jours pour réaliser les barrages. Lors de la phase de comblement nous pouvons injecter jusqu'à 10 m³ par jour et par emprise. Une fois ces 2 étapes terminées, 1 semaine est nécessaire à la prise, avant de venir réaliser le clavage sous pression qui vient combler tous les vides restants.

Lors de découverte d'anomalie dans le terrain, un passage caméra dans le forage est réalisé afin d'appréhender l'anomalie et d'adapter le plan de tirs et les équipements.

Dans certain cas, des emprises supplémentaires ont été nécessaires pour réaliser un traitement de qualité des fontis découverts (traitement via un forage vertical au droit de l'anomalie détectée).

Le comblement de la carrière se fait en cinq phases successives :

- Injection des barrages périmétriques avec un coulis spécifique, visqueux, qui permet de fermer la zone de comblement. L'injection pour ces forages est limitée à 4 m³ par jour et par forage. Des passes successives sont faites jusqu'à résurgence du coulis en surface.

- Injection de comblement avec un coulis très fluide qui remplit gravitairement tous les vides. Le critère d'arrêt volume est de 10 m³ par jour pour ces forages et l'injection est reprise jusqu'à résurgence du coulis.
- Après une semaine de prise du coulis de comblement, une injection dite de clavage est réalisée avec une pression limitée à 6 bars pour parfaire le remplissage des vides résiduels.
- Injection de traitement, en cas de présence d'anomalie dans le terrain, par passe d'un mètre avec une pression maximum de 6 bars.
- Réalisation des sondages destructifs et d'essais pressiométriques de contrôle 28 jours après la fin des injections.



Figure 11 : Exemple d'emprise pour forage : Zone 11, inclinaison du mât de la foreuse jusqu'à 45°

5.4 Les travaux en quelques chiffres

Durée des travaux :

- 2 ans
- 4 à 6 mois par zone : des fouilles de reconnaissances jusqu'à la remise en état (y compris sondages de contrôles)

Préparation de travaux / remise en état :

- 10 ouvriers
- 2 sous-traitants

Forages :

- 5 foreuses fonctionnant en parallèle
- 15 ouvriers
- 56 000 mètres linéaires forés
- 120 000 mètres linéaires d'équipement (Tubes PVC pour remplissage)

Injections :

- 2 centrales de comblement fonctionnant en parallèle
- 2 centrales de traitement
- 20 ouvriers
- 35 000 m³ de coulis injecté (tout type de coulis confondu)

1.6 km de tunnel sous les carrières divisés en 14 zones de comblement :

- Surface totale de comblement 28 730 m² (moyenne de 2 050 m² / zone)
- Ratio d'incorporation moyen d'injection 0,90 m³ / m² de surface comblée (quel que soit le nombre de niveau de carrière, essentiellement en barrage et comblement)
- Volume moyen incorporé d'injection par ml de forage : 0,54 m³ / ml

5.5 Quantités de coulis mises en œuvre

Dans l'ensemble, les travaux d'injection sont conformes aux attentes. Les volumes d'injection des carrières sont globalement cohérents avec les informations issues des cartes IGC et des reconnaissances réalisées en études.

5.5.1 Estimation des quantités marché

Les métrés du marché ont été réalisés en considérant les hypothèses de vide à combler suivantes :

- vide résiduel sur toute la largeur de la bande de 50 cm de hauteur, sur la base d'une présence de 3 niveaux de carrière ;
- majoration de cette quantité d'un coefficient de 1,20 pour prise en compte de la présence de galeries visitables dont la hauteur libre varie de 1,50 m à 3,00 m ;
- les barrages correspondent à des volumes coniques sur les 3 niveaux potentiels de carrière (1,5 m de haut, pente à 70° / vertical), sur la périphérie de la zone.

Les métrés du marché sont proportionnels à la surface à traiter et non au nombre de niveaux de carrière (considéré égal à 3 de manière sécuritaire), ni à l'état des carrières, mal connu lors de la réalisation des études du projet.

La hauteur de vide résiduel de 50 cm est plutôt sécuritaire au regard du constat de l'état des bourrages fait dans le cadre du puits de reconnaissances, mais il est assez réaliste à proximité des galeries visitables.

Ces évaluations se sont avérées sécuritaires pour les quantités de coulis de comblement, mais sous-évaluées pour les quantités de coulis de barrage.

5.5.2 Quantités consommées en phase chantier

Pour chacune des 14 zones d'injection, les quantités d'injection rapportées à la surface au sol (appelées ratio d'incorporation) ont été estimées.

Les ratios d'incorporation constatés sont représentés pour chaque zone sur la figure suivante :

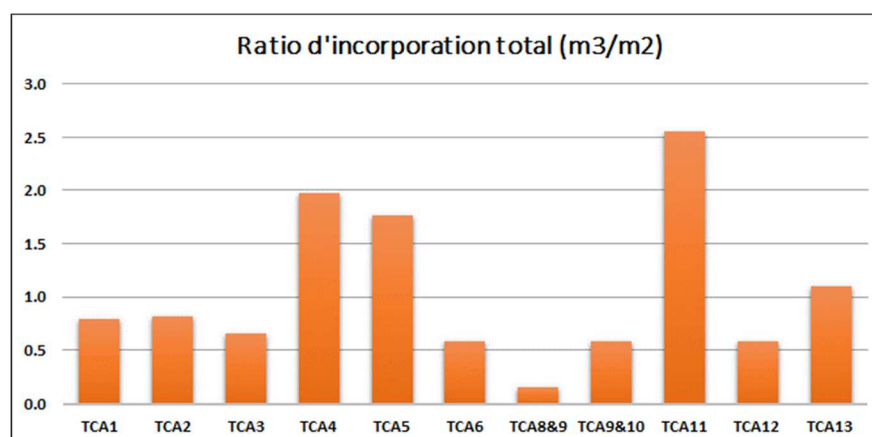


Figure 9 : Taux d'incorporation des injections pour chaque zone

Les informations des cartes IGC, les sondages, les passages caméra en forage d'injection et le suivi des auscultations apportent un riche retour d'expérience sur les quantités de coulis mises en œuvre.

Il est aujourd'hui possible de déterminer le nombre de niveaux de carrières et l'état des carrières, expliquant ainsi les quantités d'injection réalisées :

- Zones 1, 2 et 3 : un seul niveau de carrière est reconnu ;

- Zones 4 et 5 : le taux d'incorporation est élevé car ces zones sont particulièrement altérées (présence de nombreux fontis remontant dans les Marnes et Caillasses et de karsts dans le Calcaire Grossier inférieur, fractures sub-verticales traversant tout le Calcaire Grossier) ;
- Zones 8 et 9 : Le taux d'incorporation est faible, peu de carrières ont été observées en forages. Aussi, 2 côtés de la zone étaient préalablement injectés sous les ouvrages existants et un fontis était également traité ;
- Zone 11 : le taux d'incorporation élevé est lié à la présence de 3 niveaux de carrières superposés et d'un réseau d'égout abandonné ;
- Zones 12 et 13 : 1 à 2 niveaux de carrière sont reconnus sur les cartes IGC mais n'ont pas été observés en forages. De plus, une limite de la zone correspond à la limite des exploitations (front plein du CG) pour laquelle aucun barrage n'a été réalisé.

Le ratio d'incorporation total est en moyenne de $1,05 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Ce chiffre est bien en-dessous des estimations du marché mais il est néanmoins élevé par rapport à ce que l'on peut observer sur les chantiers d'injection de carrières du Calcaire Grossier à Paris, dont la valeur est plutôt de l'ordre de $0,8 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Sans les zones géologiques particulières TCA4 et TCA5, le taux d'incorporation total moyen est de l'ordre de $0,9 \text{ m}^3/\text{m}^2$, donc plus proche de ce que l'on peut observer en général.

Les ratios d'incorporation sont évalués dans le tableau 1 pour les injections de comblement ($V_{\text{comblement}} [\text{m}^3] / \text{surface au sol de la zone} [\text{m}^2]$), et pour les injections de barrages ($V_{\text{barrage}} [\text{m}^3] / \text{périmètre de la zone} [\text{m}]$).

Les volumes de barrages sont relativement importants, probablement liés à la viscosité, faible par rapport aux coulis habituellement utilisés, imposée par les nombreux forages fortement inclinés.

Tableau 1. Taux d'incorporation moyen des injections de comblement des carrières sur l'ensemble du projet

Taux d'incorporation	Toutes les zones	Toutes les zones exceptées les zones 4 & 5
Total [m^3/m^2]	1,05	0,87
Comblement [m^3/m^2]	0,55	0,47
Barrage [m^3/m]	3,68	2,96

5.6 Un fait nouveau en phase forage

La présence des vides et/ou décompressions des terrains sus-jacents aux carrières et des remblais non compactés de carrières génèrent des mécanismes d'instabilité dès la phase de forage des travaux d'injection. La forte densité des forages, parfois inclinés jusqu'à 45° pour atteindre les zones sous bâtis, nécessite une vigilance particulière : le déclenchement de fontis et de déformations en surface lors de la réalisation des forages montre que certains sont en limite de stabilité.

Dans la mesure où les carrières sont comblées et les décompressions confortées par les travaux d'injection prévus au marché, le passage du tunnelier ne devrait pas créer d'instabilités nouvelles, mais seulement un tassement du plancher des carrières et donc des terrains sus-jacents jusqu'en surface, à prendre en compte dans l'analyse de la vulnérabilité des bâtis concernés.

Les procédures d'injection ont été adaptées à la suite de différents mouvements constatés et à l'apparition d'anomalies (fontis) pour réduire les risques liés à la réalisation des travaux de comblement. Les 4 principales modifications ont porté sur :

- la limitation des durées d'ouverture de forage avant injection ;
- la protection des forages des infiltrations d'eau (pluie, ruissellement, eaux de forages...) ;
- la sécurisation des forages inclinés passant sous les fondations des bâtiments (comblement du vide annulaire par la mise en place de sacs séparateurs ou système équivalent) ;
- la sécurisation par injection de traitement des fontis et puits comblés (connus et découverts en forages par exploitation des diagraphies de forage et des passages caméra).

6 Conclusion

Dans l'ensemble, les travaux d'injection se sont déroulés conformément aux prévisions, dans le respect du planning global et des quantités prévues au marché.

Les volumes d'injections des carrières sont globalement cohérents avec les informations portées sur les cartes IGC et avec les reconnaissances réalisées en études. Le ratio d'incorporation moyen est de l'ordre de $0,9 \text{ m}^3/\text{m}^2$ excepté pour 2 zones géologiquement altérées pour lesquelles le taux d'incorporation a dépassé $1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Les sondages destructifs de contrôle ont confirmé le bon remplissage des carrières (absence de vide constaté avec les paramètres d'avancement des sondages dans les zones comblées gravitairement) et une raideur minimale des terrains atteinte dans les zones traitées (raideur cible de 0.6 MPa en pression limite conformément aux exigences de l'IGC).

A la date de rédaction de l'article, le tunnelier est arrivé en gare du Kremlin Bicêtre Hôpital, après le passage sous les zones de carrières 1 à 6. En zone 1, avec 60 m de couverture par rapport à la surface et 3 à 5 m de couverture par rapport au plancher des carrières, les déformations en surface sont quasi nulles. A l'avancement du TBM, la couverture diminue (25 m au niveau de la gare) et l'état du Calcaire Grossier et des carrières se détériore. Néanmoins, les cuvettes de tassement en surface se limitent à un maximum de 7 mm à l'axe sur bâtis et voiries (en moyenne autour de 4-5 mm à l'axe).

Ainsi, en dépit de quelques aléas de chantier, la réalisation d'un chantier d'une telle ampleur dans un secteur aussi contraint fut une belle réussite, grâce aux actions concertées de la Maîtrise d'Ouvrage, de la Maîtrise d'Œuvre et de l'Entreprise.

7 Références

- Notice Technique du 15 juillet 2004 – Travaux de consolidation souterraines exécutées par piliers maçonnés dans les carrières de Calcaire Grossier situées en région parisienne
- Notice Technique du 6 janvier 2003 – Injection gravitaire, clavage et traitement des fontis, préalables à la mise en œuvre de fondations profondes, de type pieux ou micropieux de type supérieur ou égale à II, en zone sous minée par d'anciennes carrières souterraines ou à ciel ouvert
- Notice Technique du 15 janvier 2003 – Travaux de consolidation souterraines exécutés par injection pour les carrières de Calcaire Grossier, de gypse, de craie et les marnières
- Rapport d'étude INERIS-DRS-07-86042-02484A du 15 février 2007 – Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : surveillance traitement
- Recommandation GT32R2F1 du juillet / août 2012 – Caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrologiques et géotechniques
- ARBIZZI, S. KREZIAK, C., LEPARMENTIER, AM. – Cartographie de l'aléa induit par d'anciennes carrières souterraines en milieu urbain dense. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – JNGG, 2006 Lyon
- MERLE, D. – Stratotype Lutécien. Paris : Publications scientifiques du Muséum, 2008
- TRICLOT, J. et BERRAUD, J-P. – Réalisation du creusement de la tête est du tunnel sous la terrasse de Saint-Germain. Travaux souterrains : des techniques et des hommes. Journées d'études internationales de Chambéry (1996-10-21/24)
- VACHAT, J.C. – Les désordres survenant dans les carrières de la région parisienne. Etude théorique et pratique de l'évolution des fontis (1982). Thèse du CNAM, pp 115-126.