

## La prise en compte des aléas géologiques dans la conception du tunnel EOLE

BALAN ALAIN<sup>1</sup>, ANDRE DANIEL<sup>2</sup>

1. SNCF ENGINEERING, Direction of Large Infrastructure Projects, 40, rue d'Alsace, 75475 Paris Cedex 10, France

alain.balan@sncf.fr

2. SNCF ENGINEERING, Technical Direction, 6 avenue F. Mitterrand, 93574 La Plaine St Denis Cedex, France

daniel.andre@sncf.fr

### Résumé

L'intégration du tunnel de la ligne E du RER (projet EOLE) réalisé au tunnelier entre les gares Magenta et Haussmann-Saint-Lazare sous le tissu urbain dense et vétuste de Paris a conduit la SNCF à mettre en œuvre une démarche de gestion globale des risques. La prise en compte du risque géologique a été au centre des préoccupations des concepteurs et des réalisateurs tout au long du déroulement du projet.

Le géologue de génie-civil exerce ses compétences dans l'incertain. Lors de la conception du tunnel inter gares de la ligne E du RER (projet EOLE), face aux différentes options qui se présentaient : utilisation de tunnelier ou de procédés traditionnels, tunnel monotube ou bitube, confinement à pression de boue ou à pression de terre, implantation du profil en long et du tracé, la prise en compte de la géologie et de ses incertitudes fut déterminante. L'objet de cet article est de rendre compte des processus de choix.

### Le projet réalisé :

Le tunnel de la jonction entre l'entonnement sud de la gare Magenta et l'entonnement est de la gare Haussmann-St Lazare est constitué de deux tubes parallèles de 6,40m de diamètre intérieur, comportant chacun une voie de 1 700m de longueur. Les tubes sont revêtus de voussoirs en béton armé de 35cm d'épaisseur, et sont reliés entre eux par trois rameaux de communication. Le profil en long passe sous deux ouvrages souterrains importants, la ligne B du RER et le collecteur des Coteaux.

### Les contraintes d'exécution

La construction de l'ouvrage devait répondre à plusieurs exigences :

- respect des engagements budgétaires ;
- compatibilité avec le planning global de la ligne ;
- minimisation des nuisances: tassement de surface, désordres sur le bâti, circulation routière, bruit.

Le respect de ces exigences a été un objectif constant dans la démarche des concepteurs.

### Le contexte géologique

Les horizons géologiques traversés sont successivement, dans le sens est-ouest: les Sables de Beauchamp, les Marnes et Caillasses et le Calcaire Grossier.

- Les Sables de Beauchamp, d'une épaisseur d'une dizaine de mètres, se présentent sous la forme d'un sable très argileux, bleu à vert, parfois grésifié.
- Les Marnes et Caillasses, épaisses d'une vingtaine de mètres, sont composées d'une alternance irrégulière de marnes blanchâtres, de calcaires coquilliers ou siliceux et de gypse. Les lentilles de gypse lorsqu'elles sont dissoutes, laissent place à des vides francs ou des zones de terrains décomprimés par suite d'effondrements (fontis) pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres cubes.
- Le Calcaire Grossier, qui peut dépasser dix mètres d'épaisseur, est un ensemble de bancs calcaires tendres, sains et peu fissurés avec à sa base des intercalations sableuses.

Tous ces terrains sont également le siège de nappes. De plus, d'importantes circulations d'eau étaient signalées dans les Marnes et Caillasses.



① Calcaire de St.Ouen - ② Sables de Beauchamp - ③ Marnes et Caillasses - ④ Calcaire Grossier

*Figure n°1 : Profil en long géologique*

### Les investigations géologiques

Si les grandes lignes de la géologie parisienne sont bien connues, ses détails ainsi que le comportement des terrains le sont beaucoup moins. D'importantes investigations ont donc été réalisées pour appréhender avec le plus de précision possible les terrains devant être traversés.

Ces reconnaissances avaient un triple objectif

- préciser la position des contacts entre les différents faciés ;
- connaître la distribution des valeurs des caractéristiques géomécaniques des terrains ;
- identifier les anomalies inhérentes à certaines formations telles que variations de faciés, hétérogénéités, fracturation, déconsolidation...

La reconnaissance des terrains s'est déroulée en plusieurs phases, par

- sondages carottés ;
- sondages pressiométriques ;
- diagraphies en forage ;
- essais d'eau en forage ;
- pose de piézomètre en forage ;
- mesures sismiques entre forages (cross-hole) ;
- essais d'identification et essais de comportement mécanique sur échantillons en laboratoire ;
- puits et galeries de reconnaissance et d'essais (essais d'injection, de jet grouting, de pompage, et essais de déformation à la plaque).

In fine l'espacement moyen entre forages était de 25 mètres environ. Cette valeur résultait d'un compromis entre la nécessité de reconnaître le plus complètement possible les terrains et les possibilités d'accès en surface.

La position des forages a été déterminée après une analyse des éléments bibliographiques recueillis (extraits de la banque de données du BRGM, information du service des Carrières, publication du LRPC du Bourget). Cette connaissance mettait en évidence une zone de gypse en place, une zone de gypse dissout, une zone de transition, ainsi que des variations d'épaisseur des couches et un anticlinal côté St Lazare.

Le programme a également été établi en tenant compte de la proximité d'ouvrages particulièrement sensibles (lignes de métro, collecteurs).

Les deux puits de reconnaissances, de 5 mètres de diamètre et 30 mètres de profondeur, recoupaient tous les terrains devant être traversés par le tunnel. A partir de ces puits, des galeries de reconnaissances ont été creusées pour tester le comportement à court terme des terrains et valider les méthodes de soutènement.

### **Les incertitudes géologiques résiduelles**

A l'issue des investigations et malgré la densité de forage, de nombreuses incertitudes subsistent. Ces incertitudes résiduelles, de nature à compromettre le respect des exigences du projet, sont de deux types : les anomalies potentielles ou aléas et les imprécisions.

Le contexte laissait présager plusieurs natures d'aléas géologiques :

- cavités de dissolution du gypse au sein des Marnes et Caillasses ;
- terrains décomprimés dans les Marnes et Caillasses et le Sable de Beauchamp ;
- lentilles gréseuses dans les Sables de Beauchamp ;
- flexures locales de couches.

Si ces phénomènes étaient prévisibles, leur localisation et leur ampleur étaient inconnues.

Les résultats de reconnaissances présentent toujours des imprécisions qui devaient être prises en compte notamment dans l'estimation des performances de creusement :

- dispersion des valeurs des caractéristiques géomécaniques des terrains ;
- variations minéralogiques et géomécaniques au sein d'un même faciès ;
- densité et comportement des blocs calcaire au sein des Marnes et Caillasses ;
- imprécision sur la position des interfaces entre couches.

Ces incertitudes et notamment les aléas identifiés ont fortement pesé dans le choix de la méthode de construction.

### **La problématique de la méthode constructive**

Deux grandes familles de méthode étaient a priori envisageables pour réaliser le creusement: les méthodes conventionnelles, dans lesquelles les tunnels sont réalisés classiquement par différents ateliers (excavation, soutènement, revêtement) intervenant de façon séquentielle, et les méthodes mécanisées réalisées au moyen de machine pleine section (tunnelier) regroupant la totalité des ateliers.

#### *Les méthodes conventionnelles*

Leur avantage tient à leur adaptabilité aux conditions rencontrées, notamment en cas d'aléas.

Mais ces méthodes trouvent leurs limites dans des terrains très aquifères et sensibles aux tassements où des procédés lourds et coûteux sont incontournables. Des traitements de terrain difficiles étaient donc à prévoir. Par ailleurs, les faibles cadences prévisibles ne pouvaient conduire qu'à un dépassement du délai imparti ou à de multiples puits d'attaque intermédiaires très gênants pour la circulation. Dans ce contexte ces méthodes répondaient donc mal aux exigences de coût, de délai et d'impact du projet.

#### *Les méthodes mécanisées*

Leurs avantages et inconvénients se situent à l'opposé des méthodes précédentes. Les tunneliers permettent en effet de creuser des ouvrages de grandes longueurs dans des terrains tendres et aquifères de façon plus économique qu'en méthodes conventionnelles, avec des cadences 5 à 10 fois plus élevées, et des tassements plus réduits, à condition toutefois que la machine soit bien adaptée au site et correctement utilisée.

En revanche une méthode mécanisée est peu adaptable en cas d'imprévu. De plus, elle ne peut viser un rendement optimal dans plusieurs horizons différents.

Néanmoins, la meilleure adéquation de cette méthode avec les exigences économiques et environnementales du projet a fait retenir une solution au tunnelier.

Ce choix impliquait de décider entre une option tunnel simple à double voie, nécessitant un tunnelier de 11 m environ de diamètre, ou une option double tunnel à voie unique avec un tunnelier de 7 m. C'est la seconde solution qui fut retenue, d'une part parce qu'elle permettait une meilleure insertion dans la sous-sol, ce qui raccourcissait la longueur du tunnel, et d'autre part, parce qu'un tunnelier de plus petit diamètre paraissait techniquement plus facile à maîtriser, notamment en cas d'aléa.

Compte tenu de la sensibilité de ce type de méthode, il était alors nécessaire d'analyser toutes les incertitudes géologiques pour définir le type de machine le mieux adapté, notamment le mode de confinement du front de taille.



**Figure n° 2 : Tunnelier « Martine »**

### **Analyse des risques dans le cadre de la solution mécanisée**

Seuls les risques de nature géologique sont développés ici. L'analyse a été menée à partir des exigences du projet, en cherchant à identifier toutes les causes susceptibles de nuire à ces objectifs. Des dispositions étaient ensuite prises en tenant compte de la probabilité d'occurrence de chacune des causes afin de les gérer de la façon la plus appropriée.

#### Risque de tassement

Plusieurs causes d'origine géologique sont envisageables :

- présence de vide ou de terrain décomprimé ;
- terrain moins résistant que prévu ou plus déformable.

Ces causes ayant été jugées comme affectée d'une criticité élevée, plusieurs dispositions furent prises pour la réduire :

- les reconnaissances préalables ont été densifiées (cross-hole).
- des reconnaissances à l'avancement par forages à travers la tête du tunnelier et par radar géologique à partir des forages ont été réalisées systématiquement dans les zones à risque, afin de définir et de circonscrire au mieux le phénomène et de permettre le comblement par injection préalablement à la phase de creusement. Cette technique de reconnaissance à l'avant d'un tunnelier constituait une première.
- un mode de confinement par pression de boue régulé à l'air comprimé a été retenu. Cette technologie paraissait plus apte à assurer la maîtrise des pressions de confinement au front que tout autre procédé, et par voie de conséquence à limiter les tassements de surface consécutifs à la décompression du front. Le procédé de confinement à la boue permet aussi de faire face à la présence de cavités karstiques en charge, qui constituait l'aléa majeur de ce projet, grâce à la réserve de boue disponible (environ 80m<sup>3</sup>). De plus, dans ce système, les capteurs de pression et de débit de boue contribuent à la détection des anomalies de terrain. Enfin, en cas d'importants aléas, ce type de tunnelier permet d'accéder au front. L'inconvénient de ce système est qu'il nécessite l'installation d'une importante logistique (pompes, station de traitement...).
- un suivi des mouvements de sol par des mesures topographiques avec traitement rapide des données pour intervention rapide en cas d'alerte a été mis en place.

#### Risque d'effondrement

Ce risque se présente comme le terme ultime du risque de tassement. Son origine peut être attribuable à :

- la présence de vide ou de terrain décomprimé ;
- l'existence de vestiges non connus (anciens puits...) qui pourraient être déstabilisés par le creusement.

Les dispositions mises en place pour réduire ce risque sont identiques à celles développées ci-dessus.

#### Risque de retard sur le planning

Ce risque peut avoir une multitude d'origines. Sur le plan géologique, il peut provenir soit de l'aléa karstique déjà évoqué, soit d'une mauvaise adéquation machine – terrain.

Concernant ce deuxième point, l'expérience montrait en effet que de légères variations de faciès pouvaient affecter sensiblement les performances de la machine.

Une analyse préalable des conditions de creusement a été élaborée. Elle a conduit à monter sur la tête de coupe, d'une part des outils destinés à abattre les sols meubles (dents) et, d'autre part, légèrement en saillie par rapport à ces derniers, des molettes pour abattre les terrains les plus durs. La possibilité de rencontrer des niveaux silicifiés a conduit à prévoir un concasseur dans la chambre d'abattage afin d'éviter une obstruction du circuit de boue.

Des plannings au plus tôt et au plus tard ont été élaborés pour tenir compte des plages de variation des caractéristiques géomécaniques des terrains rencontrés.

Par la suite, ce sujet sensible a fait l'objet d'une thèse à l'université de Marne-La-Vallée en vue de la construction d'un modèle d'adéquation machine – terrain. Cet outil qui fait appel aux théories de la logique floue est destiné à relier aussi rationnellement que possible l'expertise des géologues à celle des ingénieurs en vue de fiabiliser les prévisions d'avancement et leur marge d'incertitude.

#### Risque économique

Trois facteurs principaux de dépassement étaient envisageables :

- les dépassements de quantités prévisionnelles.

En méthode mécanisée, le risque de dérive des quantités de soutènement et de revêtement du fait d'une mauvaise appréciation du comportement du terrain, est minime si l'opération est bien étudiée. En revanche la prévision de consommation de bentonite est difficile. Sa consommation dépend des pertes de boue dans le terrain et de la qualité du recyclage. Pour réduire les incertitudes dans ce domaine, des essais ont été réalisés sur des centrales de séparation, en région parisienne, à partir de prélèvements effectués dans les Sables de Beauchamp.

- la non obtention des cadences prévisionnelles qui conduirait soit à mettre en œuvre des moyens supplémentaires, soit à allonger les délais et donc les coûts de production. Ce risque dépend également de la bonne adéquation machine – terrain. Sa réduction passait par l'étude détaillée des différentes situations susceptibles d'être rencontrées.
- la rencontre d'une cavité importante qui conduirait à la fois à des augmentations de quantité pour le traitement et à un allongement de délai.

#### **Conclusion**

Les choix quant aux méthodes qui ont été effectués à l'époque de la conception du projet se sont révélés pertinents. Bien qu'un certain nombre de difficultés d'origine géologique se soient présentées, dont certaines assez graves puisqu'elles ont conduit à l'affaissement d'un immeuble rue Papillon, elles n'ont pas été de nature à remettre en cause les méthodes retenues.



*Figure n° 3 : Fontis rue Papillon*

En effet les cadences ont été voisines, voire meilleures que celles visées, malgré des difficultés de recyclage de la boue dans la traversée des sables de Beauchamp lors du percement du premier tube. Les tassements sont également restés à l'intérieur de la tolérance de 5mm, à l'exception de la zone Papillon. Cet exemple montre qu'un dialogue approfondi entre géologue et concepteur est fructueux pour le déroulement d'un projet grâce à l'anticipation des difficultés et à leur prise en compte dès le début de la conception et tout au long de l'opération.