

Effondrement sur le chantier "Météor"

Pascal Dubois

Marcel RAT

avril 2003





© RATP PIL - Didier Dupuy

560n10 - 21/02/2003

1. RAPPEL DU PROJET	4
2. ETUDES GEOTECHNIQUES PREALABLES	6
2.1 LES RECONNAISSANCES	6
2.2 LA GEOLOGIE DU SITE.....	6
2.3 LES CARACTERISTIQUES MECANQUES	7
2.4 CALCUL DE L'OUVRAGE	8
2.5 COMMENTAIRES.....	8
3. METHODES D'EXECUTION	9
3.1 AU STADE DU DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES.....	9
3.2 A L'ISSUE DE LA MISE AU POINT DU MARCHE.....	9
3.3 AU STADE DE L'EXECUTION DES TRAVAUX.....	10
4. SUIVI DES TRAVAUX DU HALL.....	11
5. ORIGINE DE L'EFFONDREMENT	13
5.1 MECANISME PROBABLE.....	13
5.2 CAUSES.....	15
5.2.1 <i>Première cause : l'état du calcaire.....</i>	<i>15</i>
5.2.2 <i>Deuxième cause : l'insuffisance du soutènement.....</i>	<i>15</i>
5.2.3 <i>Troisième cause : le comportement des acteurs pendant les travaux.....</i>	<i>16</i>
6. SECURISATION DES OUVRAGES ET DE LA ZONE ENVIRONNANTE	16
7. REPRISE DES TRAVAUX.....	17

Dans la nuit du 14 au 15 février 2003, la voûte du tunnel en construction pour le prolongement "Olympiades" de la ligne de métro "Météor" s'est effondrée, entraînant la formation d'un fontis dans la cour de l'école maternelle "Auguste Perret". Monsieur le Ministre de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer a demandé au Conseil Général des Ponts et Chaussées de diligenter une mission d'enquête administrative (annexe 1 : lettre de mission).

Ce rapport préliminaire fait le point sur les études, le déroulement du chantier, analyse les causes du sinistre et donne un premier avis sur la mise en sécurité du quartier et les conditions de reprise du chantier. Les auteurs de ce rapport ont examiné, avant tout, la partie la plus critique du projet, c'est à dire le hall de maintenance, à l'extrémité duquel s'est produit l'effondrement. Les annexes 2 et 3 donnent les listes de personnes rencontrées et les documents consultés.

Le rapport définitif complétera certains des éléments ci-dessus et développera des points complémentaires ayant trait au choix du projet, à l'organisation et au rôle respectif de la maîtrise d'ouvrage, de la maîtrise d'œuvre, de l'entreprise et des autres parties prenantes. Il formulera en outre des recommandations à caractère général, à par tir des enseignements tirés de cet accident.

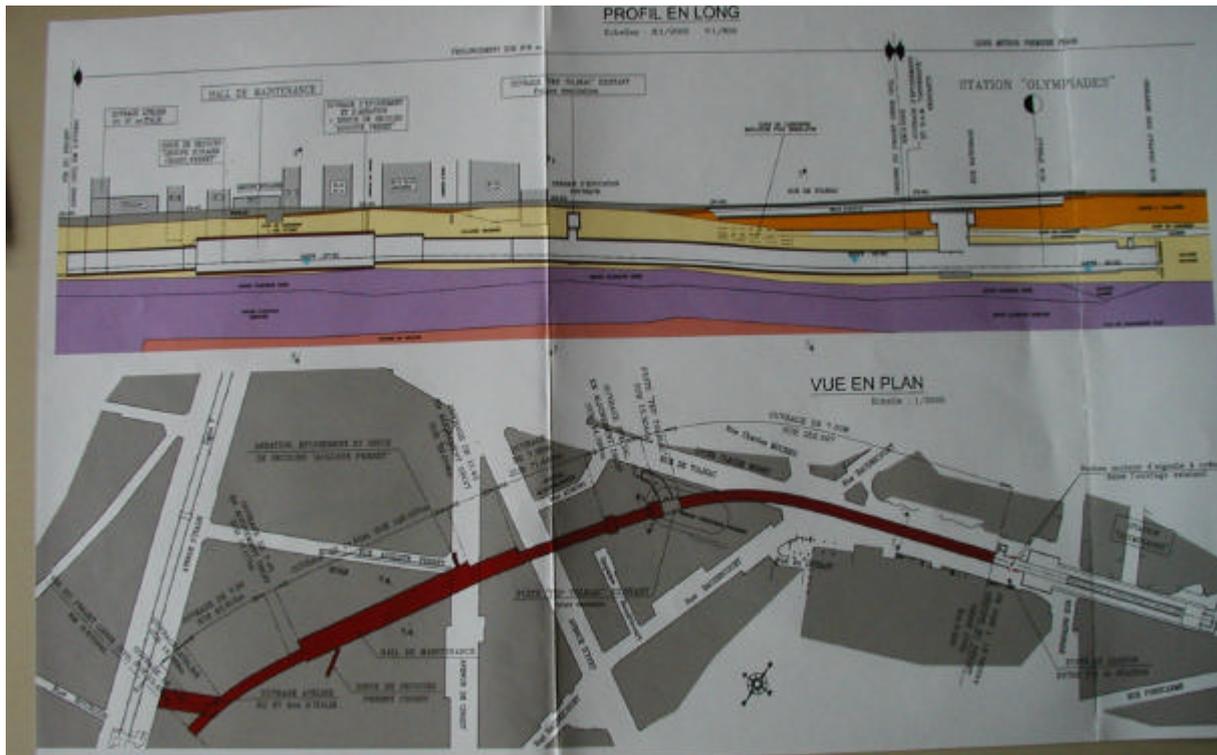
1. Rappel du projet

Les travaux liés à l'ouverture de la station "Olympiades" de la ligne de métro 14 "Météor" ont été déclarés d'utilité publique le 30 juin 1998 par décret en Conseil d'Etat. Ces travaux consistent en la réalisation :

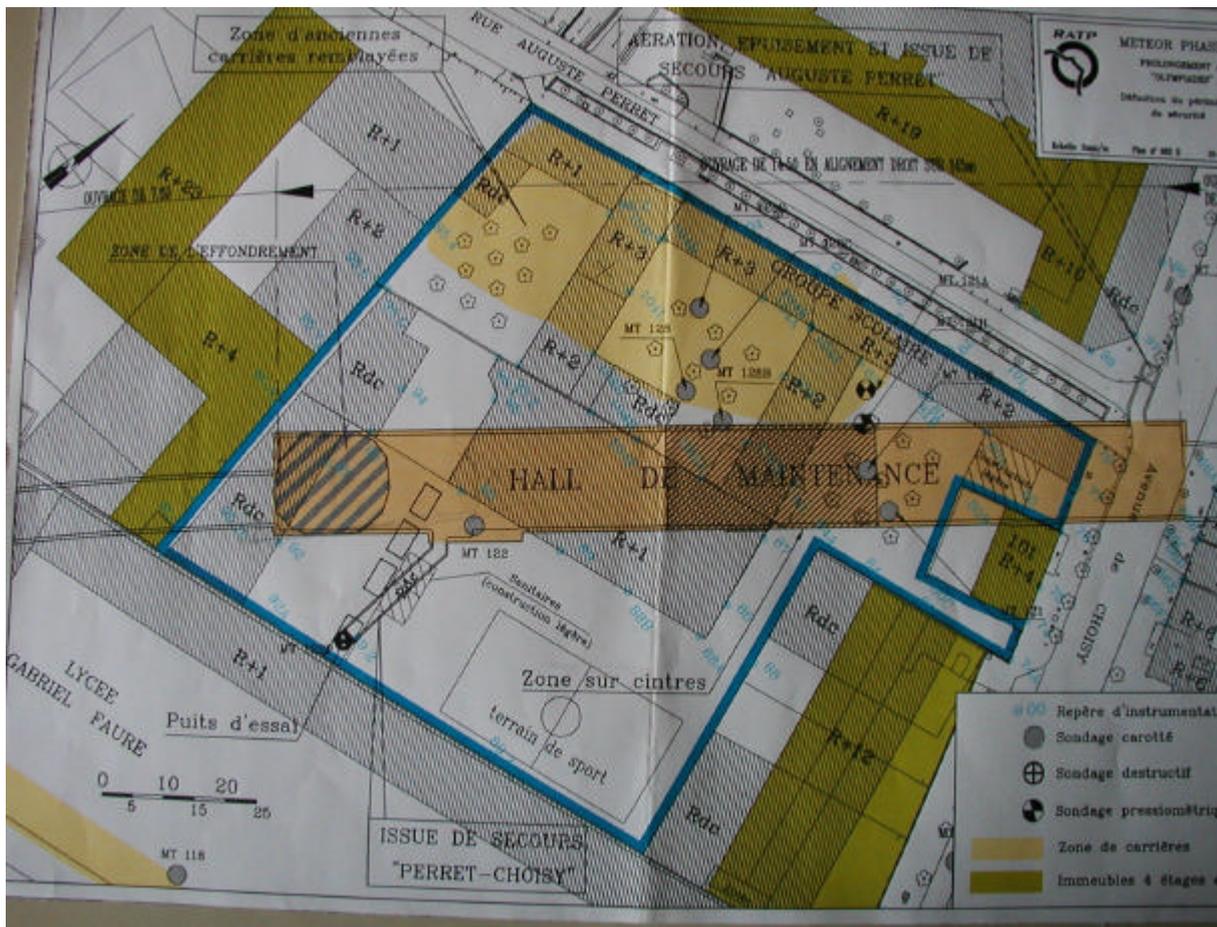
- d'un tunnel de circulation des rames de 7,60 m d'ouverture sous les rues de Tolbiac et Baudricourt et d'immeubles des avenues d'Ivry et de Choisy,
- d'un hall de 14,50 m d'ouverture sur 145 m de longueur sous les bâtiments et les cours du groupe scolaire "Choisy Perret" pour y installer un atelier de maintenance,
- d'un bâtiment d'exploitation comportant cinq niveaux de sous-sols, situé avenue d'Italie,
- de puits pour la sécurité et la ventilation.

Compte tenu des conditions géologiques – présence des argile plastiques gonflantes du Sparnacien- et de l'occupation du sous-sol (carrières souterraines, caves et parking), les ouvrages creusés en souterrain et particulièrement le hall sont situés à faible profondeur pour des travaux de ce type (9-10 mètres de couverture au-dessus de la voûte).

Le choix de l'implantation des ouvrages dans un environnement très contraint (bâtiments, école) a été fait après l'étude de plusieurs variantes qui devaient prendre en compte les possibilités de prolongement ultérieur de la ligne. Les conditions de ce choix seront analysées dans le rapport définitif.



Plan de situation



Plan du hall

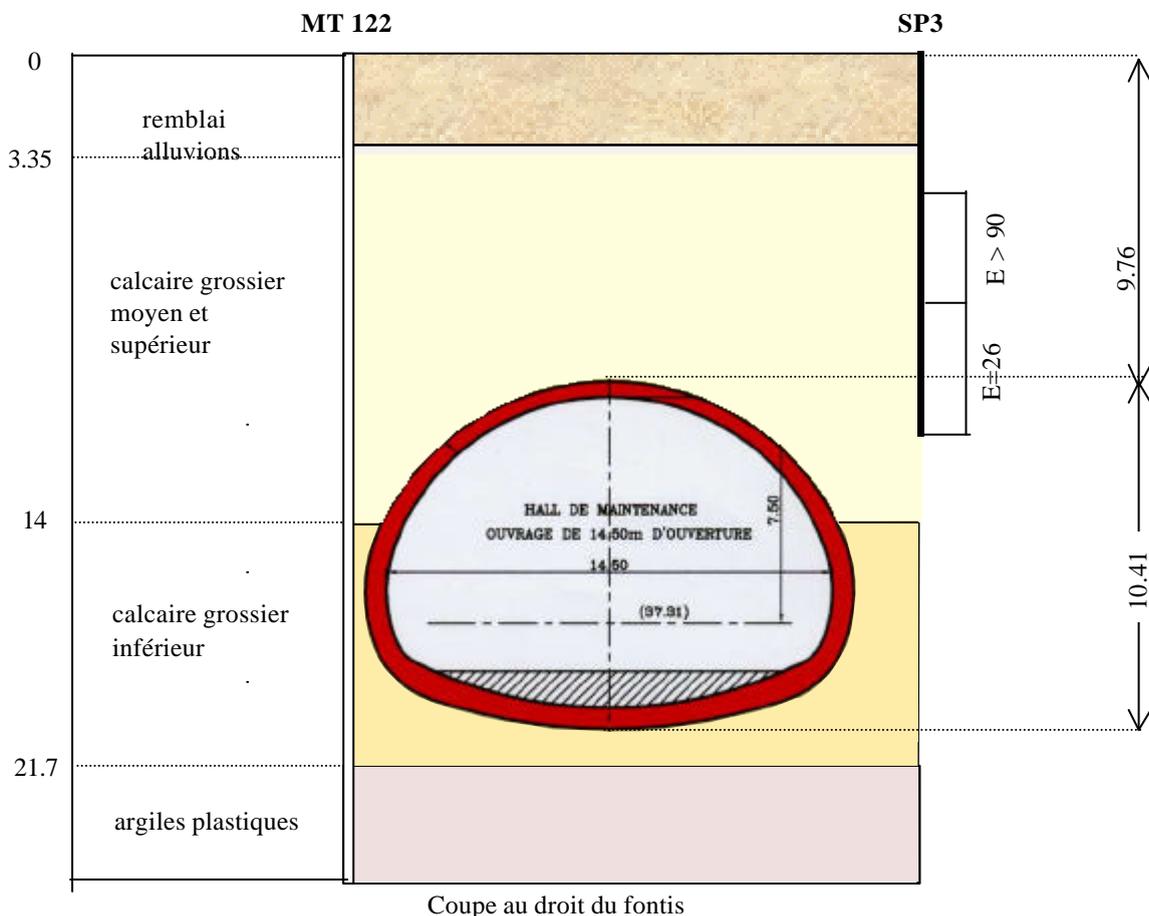
2. Etudes géotechniques préalables

2.1 Les reconnaissances

Elles se sont étalées sur une longue période : 1991 -1999 ; plusieurs entreprises de sondages y ont participé. Il en résulte une certaine variabilité dans les descriptions des terrains, même si toutes les coupes ont toutes été relevées par les services de la RATP. Le tracé, qui se développe sur une longueur de 680 mètres a été reconnu par 15 sondages carottés, un puits et 27 sondages destructifs. Compte tenu de l'étude de différentes variantes, on disposait au total de 31 sondages carottés et 35 sondages destructifs. Au niveau du hall, on disposait de 2 sondages carottés au voisinage des extrémités, d'un essaim de 12 sondages carottés pour reconnaître la zone des carrières remblayées, de deux sondages pressiométriques, de sondages destructifs et d'un puits. Les entreprises avaient pu voir des carottes et visiter le puits rue de Tolbiac, sur le terrain d'éducation physique avant de remettre leurs offres. Ces données acquises par la RATP étaient complétées par deux campagnes de reconnaissance faites par la ville de Paris dans le cadre de travaux d'agrandissement de l'école : 5 sondages pressiométriques et 6 sondages destructifs.

2.2 La géologie du site

La coupe géologique est simple : sous une épaisseur de remblais et de formations récentes de 3 mètres environ, on trouve, soit les marnes et caillasses dans la partie située sous la rue de Tolbiac, soit directement le calcaire grossier divisé en deux parties, les argiles du Sparnacien, le calcaire de Meudon et la craie. La structure géologique est très régulière, avec un léger pendage qui explique la disparition des marnes et caillasses au niveau du puits TEP.



Le calcaire grossier moyen et supérieur a fait l'objet d'exploitation de carrières: souterraine à l'est du puits TEP et à ciel ouvert au niveau du groupe scolaire. Des injections ont été faites pour les consolider et améliorer les caractéristiques des remblais utilisés pour les combler. Des soutènements plus importants ont été mis en place dans ces zones de carrières.

Le profil en long du projet a été calé pour éviter que le radier de l'ouvrage soit situé dans les argiles du Sparnacien, dont les caractéristiques mécaniques sont très défavorables. La RATP a fait faire deux études sur leur comportement et leur incidence sur les travaux : l'une au CEBTP pour "l'analyse du comportement des argiles plastiques et la vérification de la cohérence de la modélisation réalisée par la RATP", la seconde au bureau TERRASOL, compte tenu de son expérience sur les travaux « Météor » pour "l'étude de l'effet du gonflement des argiles plastiques sur les ouvrages souterrains". Le tunnel est ainsi situé totalement dans le calcaire grossier, à l'exception de quelques points très ponctuels, comme les fosses. (voir coupe).

2.3 Les caractéristiques mécaniques

De nombreux essais d'identification et de mesures des caractéristiques mécaniques ont été réalisés sur les échantillons prélevés. La rupture n'intéressant que le calcaire grossier, les autres formations n'ayant pu avoir qu'un rôle mineur, nous ne développerons que la détermination des caractéristiques mécaniques du calcaire grossier, détermination difficile liée au caractère particulier de cette formation constituée d'alternance de bancs de dureté très différente.

Elle a été faite de la manière suivante : essais sur prélèvement et comparaison avec les résultats des essais faits sur les puits de reconnaissance et les observations faites lors du creusement des ouvrages de la section précédente. La description des sondages ne met pas en évidence de variations importantes entre eux, d'autant plus que ces descriptions ne sont pas homogènes. Les essais ne peuvent être faits que sur les bancs les plus résistants ; c'est pour cela qu'il est nécessaire d'avoir une comparaison avec des travaux et des essais en vraie grandeur pour fournir une référence.

Les essais réalisés sur le calcaire grossier supérieur et moyen étaient peu nombreux. Le calage des modules sur les essais de plaque réalisés dans des puits, en dehors du site du hall, ont conduit à attribuer à ce calcaire un module de 850 MPa, contre 1000 à 1500 MPa pour le calcaire grossier inférieur. Sur le site du hall, on disposait, comme nous l'avons déjà mentionné des résultats d'essais pressiométriques. D'un sondage à l'autre, les valeurs mesurées étaient très voisines : des modules de l'ordre de 90 Mpa pour la partie supérieure du calcaire grossier (quatre mètres) et des valeurs de l'ordre de 25 Mpa sur les 4 mètres suivants, c'est à dire juste au-dessus de la voûte. Une valeur moyenne été fournie dans le dossier d'appel d'offres - 60 Mpa -, mais elle n'a pas été exploitée. En ce qui concerne la résistance, une cohésion de 500 kPa a été attribuée au calcaire grossier supérieur et moyen. Cette valeur, bien que fortement réduite par rapport aux résistances mesurées sur échantillons, ne prenait pas en compte l'incidence d'une éventuelle fracturation.

La synthèse de toutes les études a été faite par les équipes de la RATP. Le contrôle extérieur de cette synthèse a été effectué par le bureau SIMECSOL, dans le cadre d'une mission G51 selon la norme NF P 94500.

Dans son avis, SIMECSOL note que *"l'intérêt d'inscrire l'ouvrage dans le calcaire réside dans le fait que l'excavation est ainsi quasiment autostable avec des soutènements réduits"*. Il recommandait la réalisation d'essais dilatométriques, pour obtenir la valeur du module de déformation du massif, ces essais étant plus représentatifs que les essais pressiométriques et de déplacer légèrement le tracé pour s'éloigner des carrières. Il concluait, que, dans ces conditions, un soutènement provisoire léger, à base d'ancrages et de béton projeté ou de grillage serait suffisant. Cependant, pour la zone du hall, SIMECSOL retenait la solution envisagée par la RATP d'un soutènement plus lourd, constitué par des cintres réticulés et 30 cm de béton projeté, sans apporter de justification à ce choix.

2.4 Calcul de l'ouvrage

La première note de calcul a été faite par TERRASOL (rapport en date du 10/08/01), pour étudier l'effet du gonflement des argiles sur les ouvrages souterrains. Elle montre que la voûte du hall, malgré sa grande portée est autostable ; compte tenu de la commande, les auteurs ont examiné l'amplitude des tassements en surface, inférieurs à 10 mm et l'effet du gonflement à long terme des argiles plastiques. Ils n'ont pas examiné la convergence dans le tunnel, donnée qui aurait pu être utile pour la conduite du chantier.

Cette note a été complétée en mars 2002 par une deuxième portant sur l'influence de la position du toit des argiles plastiques sur les tassements de surface.

Terrasol produira une troisième note de calcul en avril 2002 pour l'étude de la stabilité de la fosse creusée dans les argiles plastiques (modélisation tri-dimensionnelle).

2.5 Commentaires

Il est très difficile d'obtenir des caractéristiques mécaniques d'une formation comme celle du calcaire grossier. La démarche adoptée est correcte, cependant toutes les conclusions n'ont pas été tirées des observations. Dans la description des sondages, il aurait été souhaitable d'examiner l'épaisseur des différents bancs : les sondages destructifs avec enregistrement des paramètres de foration montrent que dans la zone du hall, les bancs résistants ont une épaisseur généralement inférieure à 50 cm, ce qui a dû, comme nous le verrons avoir un rôle important.

Deux faits auraient dû attirer l'attention des géotechniciens :

- l'absence de carrières souterraines au niveau du projet : l'arrêt de l'exploitation à ciel ouvert et l'absence d'exploitation au niveau des galeries situées sous l'avenue d'Ivry et la rue de la Vistule pouvaient être un indice de la mauvaise qualité du calcaire grossier supérieur et moyen,
- la différence allant très au-delà des ratios usuels entre les modules d'élasticité retenus pour les calculs et les modules pressiométriques, en particulier juste au dessus de la voûte. Devant cette difficulté, on aurait du tester des caractéristiques de modules différentes (calculs de sensibilité).

D'une manière générale, on considère que le calcaire grossier est une roche homogène et on ne tient pas compte de sa fissuration, les fissures étant généralement fermées et ne jouant pas un rôle important. Les essais d'eau pratiqués dans les sondages avaient confirmé cette approche, en donnant des valeurs faibles de perméabilité, on remarquera que les travaux n'ont pas rencontré de difficultés liées à l'eau, le niveau de la nappe étant d'ailleurs plus bas que prévu. La fissuration du massif n'a donc pas été étudiée par les géotechniciens. Or, il se trouve

que la direction principale de la fissuration dans ce quartier est très voisine de celle de l'axe de l'ouvrage et est ainsi défavorable.

Nota : un essai dilatométrique vient d'être réalisé dans un sondage situé à proximité immédiate du fontis, au niveau de la voûte : il montre une très forte anisotropie des terrains, les modules selon les directions étant de 240 et 800 Mpa. Cette anisotropie est caractéristique de la fissuration

De cette analyse, il ressort que l'extrapolation de l'expérience d'ouvrages similaires a conduit à une surestimation des caractéristiques élastiques du calcaire grossier.

3. Méthodes d'exécution

3.1 Au stade du dossier de consultation des entreprises

L'expérience des précédentes excavations dans le calcaire grossier et les propriétés attribuées ont donc conduit, au stade du DCE, à envisager un soutènement léger, à base de boulonnage et de béton projeté en faible épaisseur, pour la galerie de 7,60 m d'ouverture. Dans les zones où l'épaisseur du calcaire au-dessus de la voûte du tunnel était limitée en raison de la présence d'anciennes carrières ou de sous-sols de bâtiments, le soutènement était renforcé par des cintres, pour limiter les tassements.

Pour les tronçons de 11,42 m et de 14,50 m d'ouverture, dans le dossier d'appel d'offres, la solution retenue était celle de SIMECSOL : cintres réticulés espacés de 1,50 m enrobés dans du béton projeté d'épaisseur 30 cm, mis en place après boulonnage.

Dans la zone où le hall de 14,50 m était très proche de l'ancienne carrière remblayée, il était prévu, en outre, de réaliser une galerie pilote en partie supérieure de la section, de façon à pouvoir procéder à un traitement par injection avant excavation de la totalité de la demi-section supérieure.

3.2 A l'issue de la mise au point du marché

Pour l'exécution des travaux de génie civil, la RATP a passé un marché à prix forfaitaire global avec le groupement conjoint d'entreprises BOUYGUES TP-INTRAFOR, l'essentiel des travaux, et notamment le creusement des différents ouvrages souterrains étant réalisé par BOUYGUES TP.

Lors de la phase de mise au point de sa proposition, l'entreprise BOUYGUES TP a fait connaître, à la demande de la RATP, la consistance des soutènements qu'elle prévoyait de mettre en œuvre et les prix correspondants (qui s'inscrivaient dans la décomposition du prix forfaitaire global). Ces soutènements restaient proches de ceux qui avaient été définis au stade du projet. Pour la section courante du hall (14,50 m d'ouverture), Bouygues TP avait retenu une excavation avec galerie de tête, le soutènement étant composé de :

- boulons de type Swellex, de longueur 3 m, à la maille de 1,50m par 1,50m sur tout le développement de la demi-section supérieure ;
- cintres réticulés tous les 1 m et béton projeté de 32 cm d'épaisseur ;
- béton projeté de 10 cm d'épaisseur en demi-section inférieure.

Les méthodes d'exécution retenues par l'entrepreneur, y compris la description précise des soutènements ont été inscrites dans le marché (article 1-3-3-3 du CCTP et profils-types de soutènement en annexe).

3.3 Au stade de l'exécution des travaux

Bien que le marché ne prévoise pas explicitement la possibilité de modifier les méthodes d'exécution, l'entrepreneur a formulé une proposition différente de celle inscrite dans le marché, sur la base des notes de calcul produites pour justifier la stabilité des excavations et le respect du niveau requis pour les tassements de surface.

Notamment, pour ce qui concerne le hall, la note de calculs n°1071, portant sur la zone courante (hors carrière et zones où le calcaire a une épaisseur réduite au-dessus de la voûte ou en dessous du radier, mais s'appliquant donc au tronçon où s'est produit l'effondrement), a conclu à l'autostabilité de l'excavation (sans soutènement, ce qui confirmait l'étude de TERRASOL) sur la base de calculs 2D aux éléments finis utilisant les caractéristiques mécaniques des terrains issues du CCTP: *"Aucun tassement important n'est visible au niveau du terrain naturel (maxi de 10,60 mm). On constate donc qu'aucun soutènement n'est nécessaire pour la stabilité de l'ouvrage"*. Cette note ne mentionne pas les convergences attendues lors du creusement du stross.

Ces calculs ont été complétés par une application des principales classifications géomécaniques (AFTES, Barton, Bieniawski) pour conclure à *"recommander la mise en œuvre d'un soutènement provisoire constitué d'un boulonnage systématique à un pas de 1,5 à 2 m, à arrêter en fonction de la fracturation du terrain, complété par un treillis soudé et lorsque nécessaire par une couche de béton projeté de 30 mm d'épaisseur"*. Il faut noter que l'application de ces méthodes a été très sommaire : calcul en sensibilité pour la fracturation du massif, en prenant pour seule discontinuité la stratification du massif. L'utilisation complète de ces méthodes aurait conduit à une estimation indépendante de celle retenue des caractéristiques mécaniques du calcaire grossier.

La résistance des boulons de 3m a été vérifiée par rapport à la suspension d'une épaisseur de calcaire de 1 m, ce qui montre bien que la préoccupation était la stabilité locale -chute de blocs- et non pas la stabilité de la voûte.

La RATP n'a pas accepté toutes les demandes de l'entreprise, exigeant une densité minimale de boulons et *"une coque complémentaire de 100 mm de béton projeté mise en œuvre dans la semaine suivant l'excavation"*.

Le nouveau profil-type de soutènement a été défini dans le cahier de plans n° 1585.

L'excavation était prévue en trois phases :

- demi-section supérieure, avec une hauteur de 4,30m à la clé, donc un peu réduite par rapport à celle qui figurait sur le profil-type du marché ;
- stross sur 3,20 m d'épaisseur (jusqu'au niveau du rail futur), terrassé en 2 passes verticales elles-mêmes décomposées en deux parties (droite et gauche) ;
- terrassement du radier.

En demi-section supérieure, l'excavation a été menée en avançant, avec un décalage variable, deux galeries latérales de part et d'autre d'un pilier central rectangulaire. A l'arrivée dans la zone de l'effondrement, la galerie gauche (front au pm 551) était en avance de 10 mètres sur la galerie droite, mais ce décalage s'est rapidement réduit pour osciller entre 1 et 3 m jusqu'à l'achèvement de l'excavation au pm 566.

4. Suivi des travaux du hall

L'excavation de la demi-section supérieure du hall (il est situé entre les pm 421 et 566 du projet, le pm 0 étant à la station Olympiades) s'est déroulée entre le début avril et le 25 octobre 2002. Compte tenu des différentes phases de l'excavation du stross (au moins 4), il est plus difficile de suivre la progression de sa réalisation : au niveau de l'effondrement, les travaux ont été arrêtés en fin d'année après la première phase d'excavation, car il fallait ménager la rampe d'accès à la section suivante de 7,60 m. Ils reprendront seulement le vendredi 14 février 2003, quelques heures avant l'effondrement.

Il est très difficile d'avoir une idée très précise des conditions géotechniques du chantier, car il n'a pas été suivi par un géotechnicien ; on dispose seulement des éléments suivants :

- photos du front de taille,
- comptes rendus journaliers,
- comptes rendus des réunions hebdomadaires entre la maîtrise d'œuvre et l'entreprise,
- mesures de tassement en surface et de convergence en tunnel.

La lecture des comptes rendus journaliers, rédigés par l'entreprise permet de suivre le déroulement des travaux. Ils renseignent sur la qualité des terrains et sur les hors profils. Ainsi sont mentionnés pour la première fois le 16 septembre 2002 des " *terrains mauvais!* " au pm 543 sur le côté gauche de la galerie latérale gauche (pour mémoire, l'effondrement s'est produit entre les pm 550 et 565, la notion de droite et de gauche est définie en regardant le tunnel dans le sens des pm croissants). Cette mention restera, pour cette galerie latérale, dans pratiquement tous les comptes rendus jusqu'à la fin des travaux du hall. Il semble que la densité des boulons ait été notablement augmentée. On retrouve la même mention, le 23 septembre au pm 485, mais sur le côté droit (excavation de la partie droite de la demi-sup, après achèvement de l'injection des remblais de l'ancienne carrière) Il faut noter que sur le tunnel courant, du puits TEP vers "Olympiades", cette notation n'apparaît pas, il n'y a que quelques mentions de terrains fracturés en voûte. Au-delà du hall, cette mention n'apparaît pas non plus et on trouve même une notation, au pm 576 "*terrain de bonne qualité!*" Ceci est en accord avec les reconnaissances qui avaient mis en évidence une qualité moindre du calcaire dans la zone du hall.

Les chutes de blocs importantes, généralement en clef de voûte et les hors-profils sont aussi notés : A partir du pm 485, elles se multiplient : l'imprécision des relevés ne permet pas de suivre exactement leur développement et l'orientation de ces anomalies. Leur importance est très grande, puisqu'il en résulte des hors-profils de 1 mètre alors que la couverture calcaire au dessus de la voûte, au niveau du sondage MT 122 n'est que de 6.40 mètres (coupe p 6). Il semble cependant qu'une bande de terrain de mauvaise qualité recoupe le hall entre les pm 485 et 566, sa direction étant donc très voisine de celle de la fracturation.

Les convergences mesurées sur 7 profils (dont un dans la zone effondrée) sont difficilement interprétables ; en effet, compte tenu de la méthode par sections divisées, les profils ne sont posés qu'après l'excavation complète de la demi-section supérieure ; on ne voit donc que l'effet du creusement du stross. Le massif de calcaire grossier inférieur étant peu déformable, les convergences, au niveau de la demi section supérieure sont faibles et, comme on ne dispose pas des valeurs calculées, il n'est pas possible de faire une comparaison. L'évolution des convergences est un critère de stabilité, en particulier, une évolution rapide peut être un signe annonciateur d'une rupture : compte tenu de la précision des mesures, il n'est pas possible d'affirmer si celles-ci étaient complètement stabilisées avant l'effondrement, mais on n'observait pas de variation anormale entre les deux dernières mesures (dernière mesure le 12 février 2003).

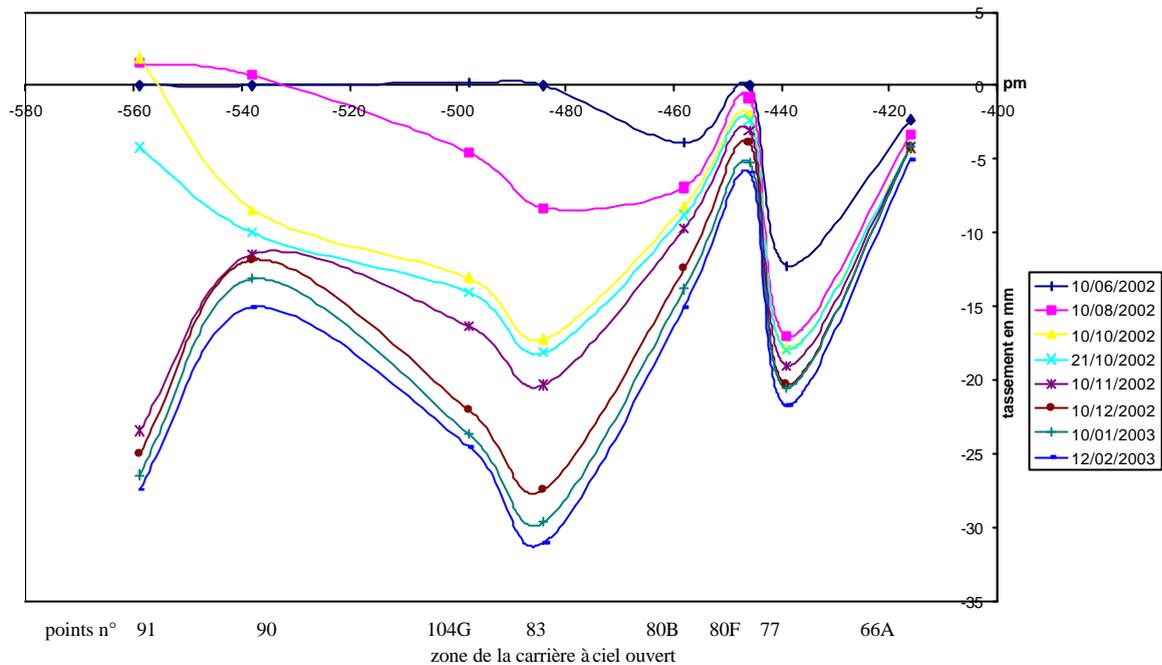


Front au pm 552

Les tassements sont eux beaucoup plus significatifs. Au cours du creusement du hall, ils ont été plus importants que ceux prévus allant localement jusqu'à 30 mm au lieu de 10 calculés et autorisés. En revanche, la cuvette de tassement est pratiquement limitée à l'aplomb du hall. Les tassements seront une préoccupation constante du maître d'œuvre. Il demandera, par exemple, un renforcement du soutènement au niveau de l'avenue de Choisy. Au niveau des carrières, les tassements ne se stabiliseront que très tardivement après l'excavation du stross. Dans la zone de l'effondrement, les tassements étaient stabilisés.

Lors de la réunion de chantier du 2 octobre 2002, l'entreprise fait part d'une réunion qui se tiendra le 18 octobre avec son conseil "Géotechnique" SIMECSOL (rappelons que SIMECSOL était intervenu pour le compte de la RATP au niveau du contrôle des études), pour fixer les conditions de réalisation du radier en fonction de la proximité immédiate des argiles plastiques (rapport SIMECSOL du 29 octobre 2002) ; les sondages destinés à vérifier la cote exacte des argiles ne seront réalisés qu'à la fin décembre et, sans attendre leur interprétation, le maître d'œuvre a demandé, le 11 décembre 2002, à l'entreprise d'étudier trois variantes pour la réalisation du radier, compte tenu de la poursuite des tassements dans la zone du hall ; le principe de la solution sera adopté le 13 février : bétonnage de la voûte, puis exécution du radier.

Les tassements importants ont toujours inquiété le maître d'œuvre, à cause des répercussions sur le bâti, mais les divergences entre les tassements calculés et ceux observés ne sont jamais interprétées en terme de caractéristiques des terrains, donc de stabilité globale de l'excavation. Aucune relation n'apparaît entre les observations faites en tunnel et les tassements



tassement dans l'axe du hall

5. Origine de l'effondrement

5.1 Mécanisme probable

Dans la zone du fontis les travaux étaient arrêtés depuis plus de deux mois, à l'exception de la pose de quelques boulons. Quelques heures avant le sinistre, le terrassement du stross avait repris. Compte tenu de sa faible importance, ce terrassement ne peut pas être retenu comme cause de la rupture, mais les ébranlements et les vibrations qui l'ont accompagné peuvent avoir joué le rôle d'élément déclencheur par rapport à un état d'équilibre limite de la voûte.

En raison des circonstances dans lesquelles s'est produit l'effondrement, aucune observation quant à son déroulement ou à d'éventuels signes précurseurs n'a pu être faite.

Les éléments dont nous disposons sont les suivants :

- observation du terrain visible sur les bords du fontis ;
- constats faits lors de l'excavation de la demi-section supérieure ;
- mesures de tassement de surface ;
- mesures de convergence en souterrain (postérieures au creusement de la demi-section supérieure).

La première observation des bords du fontis fait ressortir une différence nette entre les bords droit : -calcaire bien stratifié, en bancs peu épais- et gauche -pas de stratification-. Ce bord gauche du fontis semble correspondre à une fissure ouverte avec des traces de circulation d'eau et d'altération du calcaire, cette fissure étant localisée à la limite du piedroit. Une légère anomalie de la structure est aussi visible. D'une manière plus générale, le calcaire grossier supérieur apparaît particulièrement fissuré dans la zone de l'effondrement, (une fissure verticale est également apparente côté nord), la direction principale des fissures verticales est sensiblement parallèle à la direction du creusement, mais il existe une deuxième famille, moins marquée, dans une direction perpendiculaire.



bord gauche du fontis



bord droit du fontis

Toutes les observations faites montrent que le calcaire grossier supérieur n'a pas les caractéristiques mécaniques homogènes qui lui ont été attribuées pour les calculs. En particulier, l'effondrement démontre que le calcaire supérieur n'a pas, à l'échelle de l'excavation, en raison de la présence de bancs à faible cohésion et de fractures verticales, une résistance suffisante pour garantir la stabilité de la voûte du hall sans report de charge par effet d'arc.

Implicitement, en mettant en œuvre un soutènement léger, destiné à se prémunir contre des instabilités locales, on supposait que l'effet d'arc pourrait se maintenir dans le terrain sans difficulté. Qu'en est-il en réalité ?

A cet égard un premier élément défavorable réside dans la raideur apparemment nettement plus grande du calcaire grossier inférieur. Cela ne facilite pas la convergence de la voûte nécessaire au maintien de l'effet d'arc en cas de tendance au relâchement des contraintes de compression.

On peut ensuite observer que, plus l'ouverture de la voûte est grande, plus l'hétérogénéité et les singularités du terrain encaissant sont susceptibles de jouer de manière défavorable car :

- la voûte étant plus plate, le rayon des arcs assurant le report de charge est plus grand, ce qui, d'une part, augmente leur chargement, d'autre part, les rend plus fragiles vis à vis des phénomènes de cisaillement entre bancs ou de relâchement par déplacement d'appui ;
- la longueur des arcs étant plus grande, le risque d'intercepter des zones fracturées défavorables augmente.

Enfin , on peut s'interroger sur l'incidence de la division de la section adoptée pour le creusement de la demi-section supérieure. Cette méthode peut induire dans un premier temps un travail en flexion des bancs.

A ces conditions défavorables pour le fonctionnement en arc dans le terrain, se sont ajoutées les singularités constituées par les fissurations verticales en limite de l'excavation.

Il est probable que de légers déplacements au droit de ces zones de fissures ont entraîné une rupture brutale de l'effet d'arc. Cet effet pouvait d'ailleurs n'être que partiel, une partie des efforts sollicitant déjà le terrain en cisaillement.

La coque en béton projeté, de 10 cm d'épaisseur seulement et à contour irrégulier, n'était pas à même de reprendre un report de charge important et brutal. Elle a quand même sans doute contribué à limiter l'extension de l'effondrement. Sur les quelques mètres les plus proches du fontis on pouvait remarquer des écaillages du béton projeté en voûte et en reins, traduisant son chargement. Cette partie n'ayant pas pu être consolidée après le premier sinistre s'est

effondrée dans la nuit du 19 au 20 mars, sans que les mesures de tassement aient laissé prévoir cette deuxième rupture.

5.2 Causes

Pour expliquer la rupture, on peut mettre en avant l'état du calcaire au-dessus de la voûte ou bien l'insuffisance du soutènement. Ces deux causes sont à retenir. Il faut y ajouter une troisième : le comportement des acteurs par rapport aux constatations faites au fur et à mesure du déroulement des travaux.

5.2.1 Première cause : l'état du calcaire

La reconnaissance avait montré que le calcaire grossier moyen et supérieur avait des caractéristiques mécaniques inférieures à celles rencontrées habituellement et les géotechniciens l'avaient pris en compte d'une manière globale, mais insuffisante. En particulier, il ne semble pas que les mesures pressiométriques, qui montraient des valeurs faibles au niveau de la voûte, aient attiré leur attention. La fracturation du calcaire grossier n'est pas un élément nouveau et la densité de celle-ci permet généralement de le considérer comme un milieu homogène. La direction principale de la fracturation, qui pouvait être connue (visite des carrières souterraines) était défavorable. L'élément qui ne pouvait pas être prévu au stade des études était la présence de la fissure ouverte, qui d'ailleurs ne se prolonge pas dans le calcaire grossier inférieur.

5.2.2 Deuxième cause : l'insuffisance du soutènement

Une impression de grande sécurité vis à vis de la stabilité de l'excavation, même de grande largeur, a sans doute été donnée par les résultats des calculs, montrant de très faibles déplacements verticaux. C'est ce qui a conduit l'entreprise à proposer un allègement très important du soutènement. Ce faisant, on est passé d'un soutènement capable de supporter par lui-même la charge du terrain (voûte de 30 cm en béton projeté de forme régularisée par les cintres réticulés) à un soutènement obligeant à compter sur la résistance propre du terrain.

Pour des ouvrages à faible couverture (ici le ratio entre l'épaisseur de couverture résistante et la largeur maximale de l'excavation tombait à 0,5) il est prudent de s'interroger sur les conditions de mobilisation de l'effet de voûte dans le terrain. Cela semblait d'autant plus justifié dans le cas présent que le projet s'intégrait dans un environnement sensible.

Fondamentalement, la modélisation du massif de calcaire grossier comme un terrain aux caractéristiques homogènes était inadaptée. Même si l'incidence de la fracturation défavorable n'avait pas été perçue, le découpage en bancs de faible épaisseur, dont certains très friables, aurait dû conduire à une réflexion complémentaire. D'autre part, la prise en compte d'un module plus faible pour le calcaire grossier supérieur (en accord avec les résultats des essais pressiométriques) aurait pu alerter en faisant ressortir des déplacements du massif nettement plus élevés.

On peut regretter que l'utilisation, par l'entreprise, des méthodes de Barton et de Bieniawski, qui incitait à prendre en compte l'état de fracturation du terrain, soit restée un pur exercice au stade du calcul, dont on n'a pas cherché à vérifier les hypothèses. Il ne faut de toute façon pas oublier que ces approches sous-entendent qu'un effet de voûte peut s'établir dans le terrain.

Enfin, une confiance excessive en des calculs inadaptés a conduit à mettre en œuvre un soutènement insuffisant en regard de la taille de l'excavation, de sa faible couverture et de l'environnement de l'ouvrage.

5.2.3 Troisième cause : le comportement des acteurs pendant les travaux

Comme nous l'avons déjà mentionné dans le déroulement des travaux, de nombreux signes avaient montré que le calcaire grossier supérieur n'avait pas les caractéristiques attendues :

- tassements plus importants que prévus, dès le début de l'excavation du hall
- stabilisation des tassements très lente, après le creusement du stross
- nombreux hors profils, à partir du pm 485
- calcaire de mauvaise qualité.

L'absence de réactions des acteurs à ces constatations est surprenante. L'entreprise ne fait part de ses inquiétudes sur les tassements que le 6 décembre 2002, ce qui conduit le maître d'œuvre à lui demander d'étudier trois solutions pour réaliser le radier le 11 décembre. L'entreprise disposait pourtant dès le 29 octobre 2002 du rapport de SIMECSOL qui indiquait *"pour retrouver des amplitudes de 16 mm dans cette phase (note : cette phase signifie excavation de la demi section supérieure ; la demande a été faite avant le début du terrassement du stross), il faut soit introduire en clef de voûte une couche de calcaire avec des caractéristiques réduites (module d'Young de 300MPa au lieu de 800 et cohésion nulle au lieu de 0.5 Mpa), soit diviser par deux le module d'Young du calcaire grossier"*. Ces réflexions étaient même optimistes par rapport à la réalité : les chutes de toit de 1 m d'épaisseur et les hors-profils confirmaient la cohésion nulle sur cette épaisseur ; SIMECSOL aurait dû étudier les conséquences sur la stabilité d'une cohésion plus faible du calcaire grossier.

6. Sécurisation des ouvrages et de la zone environnante

Le jour même de l'effondrement, le maître d'ouvrage, en liaison avec la ville de Paris et la Préfecture a mis en place un périmètre de sécurité, qui incluait tout le groupe scolaire. Les mesures de tassements ayant montré une légère évolution, l'évacuation des habitants du 101 de l'avenue de Choisy et la fermeture à la circulation de cette avenue ont été décidés par mesure de prudence le 20 février. La RATP a demandé à l'entreprise d'étudier les solutions permettant d'assurer la sécurité du quartier. Plutôt que de renforcer le soutènement, il a été retenu le comblement du hall sous l'immeuble par un béton de faibles caractéristiques. Cette solution a été mise en œuvre rapidement (dès le 24 février).

Cette solution a été ensuite étendue à l'ensemble du hall pour pouvoir reprendre les travaux en toute sécurité. L'extension du fontis dans la nuit du 19 au 20 mars a montré que la stabilité de la voûte n'était pas assurée pour permettre un travail en toute sécurité et a justifié a posteriori ce choix.

La RATP a par ailleurs fait procéder à un renforcement du suivi des autres ouvrages souterrains par mesures topographiques de surface et mesures de convergences, dans l'attente de la mise en place du revêtement définitif.

La mise en œuvre du revêtement dans le tronçon de 11,45 m d'ouverture, précédant le hall, a été engagée par anticipation par rapport au programme initial de l'entreprise.

Actuellement, le comblement du hall est terminé ; la sécurité est donc assurée dans le quartier: les habitants du 101 ont pu regagner leur logement et l'avenue de Choisy est réouverte à la circulation.

7. Reprise des travaux

Le béton de faibles caractéristiques pourra être excavé sans problèmes. Pour assurer la stabilité, il sera nécessaire de terrasser par passes de faible longueur de l'ordre 5 mètres et de couler le revêtement définitif de la voûte immédiatement. Le radier sera réalisé dans une seconde phase comme l'avait envisagé l'entreprise. Il faudra s'assurer que le comblement des hors-profils a correctement été fait. Le suivi des tassements en surface doit se poursuivre. Des recommandations complémentaires pour l'exécution et le suivi de ces travaux seront données dans le rapport définitif.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de mission

Annexe 2 : Liste des personnes rencontrées

Annexe 3 : Liste des documents consultés

Annexe 1



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

2003 - 0054 - 01

17 FÉV 2003

ministère
de l'Équipement
des Transports
du Logement
du Tourisme
et de la Mer



cabinet
du ministre

note à l'attention de

Monsieur Claude MARTINAND
Vice-Président du Conseil Général des Ponts
et Chaussées

objet : mission relative à la détermination des causes de l'accident survenu samedi 15 février 2003 à l'école Auguste Perret dû au chantier du prolongement de la ligne 14 à Olympiade

Dans la nuit du 14 au 15 février 2003, est survenu sur le chantier de l'extension de la ligne METEOR dans le 13^{ème} arrondissement, rue Auguste Perret, un effondrement du terrain dépendant du groupe scolaire de cette même rue. En période d'activité scolaire, cet accident aurait pu entraîner des conséquences dramatiques. Le caractère spectaculaire de cet effondrement, à l'aplomb du futur atelier d'entretien des trains de METEOR, a imposé des mesures conservatoires de précaution.

Je souhaite, en complément de l'enquête interne déjà lancée par la RATP, que le conseil général des ponts et chaussées diligente une enquête administrative portant sur les points suivants :

- détermination des causes de cet accident et analyse des rôles respectifs du maître d'ouvrage, du maître d'œuvre et de l'entreprise chargée du chantier,
- analyse des mesures conservatoires prises par le maître d'ouvrage et les services de sécurité civile pour sécuriser le chantier et les propriétés riveraines,
- analyse des mesures à mettre en œuvre pour sécuriser les ouvrages, lever les mesures conservatoires et achever le chantier,
- propositions de mesures générales destinées à éviter la survenance de nouveaux accidents de ce type.

Je souhaiterais disposer de vos premières conclusions et propositions dans un délai de quatre semaines.

Mes services ainsi que ceux de la RATP sont à votre disposition pour vous fournir toute l'assistance nécessaire pendant le déroulement de la mission.

Hôtel de Roquelaure
246, boulevard
Saint-Germain
75007 Paris
adresse postale :
92055 La Défense cedex
téléphone :
01 40 81 21 22
mél : cabinet-equipement
@equipement.gouv.fr

Gilles de ROBIEN

Annexe 2

Liste des personnes rencontrées

M. Cherel : délégué du Directeur - Département Projets et Ingénierie des lieux - RATP

M. Bouchain : Géologie - Géotechnique -Département des infrastructures et Aménagements

Ont participé comme observateur aux entretiens :

M. Valancogne : responsable de l'unité "Maîtrise des risques systèmes" RATP

M. Mougel : chargé d'étude -maîtrise des risques systèmes-

Annexe 3

Liste des documents consultés

Reconnaissance

- Ensemble des Documents RATP pour la note Simecsol NT/01/08605/070/01A : avis sur le dossier d'études de la RATP
- Rapport Simecsol : avis sur le dossier d'études RATP (8605.01A) ;
- Rapport Terrasol : effet du gonflement des argiles plastiques sur les ouvrages souterrains (17086.01)
- Bons de commande Simecsol/Terrasol/Cebtp

- Sondages et puits : plans 004A, 090B, 091B, 2124B, sondages MT53, MT54, MT55, MT56, MT57, MT58, MT59, MT61, MT75, MT76, MT101, MT102, MT103, MT104, MT105, MT115, MT116, MT117, MT118, MT119, MT120, MT121, MT121C, MT21G, MT122, MT126, MT127, MT128, MT128B, MT128C, MT128D, MT129, MT130, S80, S81, MT122P puits d'essai ;
- Sondages et essai labo (Simecsol 8605.14A et Botte 3157) ;
- Essais de Labo dans les marnes de Meudon (Simecsol 8605.14A, Solétanche 011549(1)) ;
- Essais dans les marnes de Meudon (Simecsol 8605.15A, Solétanche 101.15495(2)) ;
- Etude en laboratoire des argiles plastiques (Simecsol 8605.30.01A) ;
- Essai à la plaque et au cisaillement (Simecsol 8605.28.01A) ;
- Rapport du puits d'essai (Simecsol 8605.25.01A) ;
- Rapport d'essais sur sondages complémentaires (Simecsol 8605.16.01A) ;
- Rapport d'essais Calcaire grossier (Simecsol 8605.16.02A) ;
- Rapport d'essais Argiles plastiques (Simecsol 8605.16.03A) ;
- Rapport d'essais en laboratoire (Simecsol 8605.1901A) ;
- Rapport d'essais complémentaires MT120-121-122 (Simecsol 8605.17.01A) ;
- Rapport d'essais en labo MT119 à 122 calcaire grossier (Simecsol 8605.17.02A) ;
- Rapport d'essais en labo MT119 à 122 argiles plastiques (Simecsol 8605.17.03A) ;
- Sondages et essais 1997 (Simecsol 8605.18.01A ; 8605.18.04A ; 8605.18.05A)
- Compte rendu forages carottés et piézométriques (Sobesol 13701 ; 13701-1 ; 14218)
- Saint Lazare-Maison blanche : reconnaissance complémentaire (Solétanche 1.0.1549) ;
- Reconnaissance géologique (Botte 3221) ;
- Reconnaissance géologique complémentaire (Botte 3595)
- Compte rendu de reconnaissance géologique (Botte 970296.2)
- Analyse des argiles plastiques (Reig 94-118) ;
- Rapport d'analyse (Reig 97178) ;
- Rapport d'analyse MT120 à MT122 ;
- Recherche des carrières, rapport Fondasol IP97229 ;
- Reconnaissance des sols sous le réfectoire du groupe scolaire (Etudes de Sol et Fondations 95-4144) ;
- Etude de faisabilité géotechnique groupe scolaire Choisy-Perret (Solen SE01132PA) ;
- Rapport concernant les mesures de nivellement pendant la construction de l'ouvrage "Tolbiac-Nationale" (Simecsol 8605.42.05A)
- Rapport sur l'incidence des argiles plastiques sur la stabilité de l'ouvrage (Simecsol 8605.42.01B)

Notes de calcul de l'entreprise avec fiches d'observation de la maîtrise d'œuvre:

- soutènement provisoire Section 14.50 PK 421 à 566 (hors 494 à 509) n°1071 indice 1
- soutènement provisoire Section 14.50 PK 421 à 566 (hors 494 à 509)n° 1071 indice C
- soutènement provisoire Section 14.50 PK 421 à 566 (hors 494 à 509)n° 1071 indice B
- soutènement provisoire Section 14.50 PK 421 à 566 (hors 494 à 509)n° 1071 indice A
- soutènement provisoire zone sous carrières, n° 1091 indice 1
- Note de calcul complémentaire à la NC 1091, n° 1093 indice 2
- soutènement provisoire section 14.50 zone avec fosse, n° 1077 indice A
- soutènement provisoire section 14.50 PK 421 à 471, n° 1075 indice 1
- Note de synthèse d'étude des tassements du hall de maintenance section 14.50, n° 1080 indice 1
- excavation du stross PK 421 à 471, section 14.50 n° 1079 indice A
- reprise des pieds de cintre section 14.50, n° 1092 indice 1

Plans

- Plan de situation (Profil en long, vue en plan et coupe générale) , n° 001 indice A
- Plans d'emplacement des repères d'auscultation sur les bâtiments : , n° 050 indice F
- Plans de phasage de réalisation section 14.50, n° 0867 indice C
- Plans de phasage général de réalisation hall de Maintenance, n°0868 indice C
- Plans de définition des sections, intrados des voûtes 11.42 et 14.50, n° 0862 indice A
- Plans de soutènement provisoire section 14.50 PK 421 à 473 et 507 à 566, n°1585 indice 1
- Plans de soutènement provisoire section 14.50 PH 473 à 507, n° 1591 indice 1

Déroulement des travaux

- Ordres de service
 - Compte rendu de chantier RATP
 - Cahier de chantier RATP
 - Rapports Journaliers Bouygues
 - Fiches de plot terrassement (constat)
 - Fiches de plot Béton Projeté (constat)
 - Dossier sur les résultats des mesures de convergences
 - Evolution des tassements dans le temps, (dossier A4 de 11 P.)
 - Reconstitution des travaux de la zone du Hall de Maintenance sous forme de planning de chemin de fer (4 feuilles)
 - DCE : Méthode d'exécution des tunnels 1 ITA ILI EGC 118 062
 - DCE : 680 GOE TN 061 00A
 - Note Simecsol 01/13061/A01/NT/02/A : avis sur les conditions de réalisation du radier
 - Note Simecsol 01/13061/A01/NT/03/A : avis sur les conditions de réalisation du radier ; note complémentaire
 - Note Terrasol 17738/03 : Analyse 3D de l'influence du creusement de la fosse
 - Note sur les mesures d'urgences engagées depuis le samedi 15 Février 2003
 - Dossier d'exécution des travaux de remplissage sous l'avenue de Choisy et bâtiment 101, n° 0531 indice A
-
- CD-R contenant des photos