

GESTION DES RISQUES CAVITES SUR LA LGV EST EUROPEENNE 2EME PHASE.

RISK MANAGEMENT OF CAVITIES ON THE EAST EUROPEAN LGV 2ND PHASE

Pascale MASSAAD¹, Alain CUCCARONI², Didier THOMAS², Dominique BOULANGEOT², Olivier LORIO³

1 Tractebel Engineering, Gennevilliers, France

2 Réseau Ferré de France, Paris, France

3 Tractebel Engineering, Bruxelles, Belgique

RÉSUMÉ — Quel est le rôle de l'Assistance à la Maitrise d'Ouvrage Technique de RFF, dans le cadre de la LGV Est Européenne 2ème phase (entre Baudrecourt et Strasbourg), dans la démarche suivie pour la gestion des cavités sur la totalité des 106 km de cette ligne ? L'AMOT/RFF assure la pleine maîtrise du processus tant en phase de conception qu'en phase de réalisation. Sur le plan technique, le traitement des cavités s'appuie sur les référentiels en vigueur et sur les procédures de RFF. Ces différents documents déclinent les étapes des processus à suivre dès la découverte d'une cavité ou d'indices de cavité. Pour ce faire, des échanges techniques entre les entreprises, le MOE et l'AMOT/RFF sont menés dans le but de permettre la définition et l'engagement de traitement éventuellement nécessaire dans les secteurs d'aléa cavité, dans des délais compatibles avec les marchés de travaux. L'article présente deux études de cas rencontrés sur la dissolution de gypse, la première sur le lot 35 présentant essentiellement des cavités franches (dans le cadre d'un marché en conception réalisation) et la deuxième sur le lot 42 à contrario présentant un système majoritairement de cavité de petites tailles et des zones décomprimées (en MOE classique). A travers ces deux exemples sont rappelées succinctement les méthodes d'investigations et de traitement retenus par les MOE et les entreprises. La méthodologie adoptée par l'AMOT/RFF pour donner les garanties des traitements conformément aux attentes et à la pérennité de l'ouvrage sera exposée.

ABSTRACT — What is the role of the Assistance to the client technology of RFF, in the management of cavities on the 106 km of the second phase of the east European high speed line (between Baudrecourt and Strasbourg)? The AMOT/RFF provides full control of the process in the design and construction phases. On a technical level, the treatment of cavities is based on the existing standards and procedures of RFF. These documents highlight the procedure to follow upon discovery of a cavity or a cavity track. Technical exchanges between contractor, the MOE and AMOT/RFF are conducted in order to allow the identification and the consequent treatment necessary in the areas of hazardous cavity, within a timeframe compatible with works contracts. The article presents two case studies concerning

the dissolution of gypsum. The first on Lot 35 contains essentially true cavities (in the context of design and built) and, to the opposite, the second on lot 42 composed predominantly of small cavity sizes and decompressed areas (classical MOE). Through these two examples are recalled briefly the methods of investigation and treatment selected by the MOE and contractors. We will depict the methodology adopted by the AMOT/RFF to guarantee the treatment in line with expectations and sustainability of the structure.

1. Introduction

Après l'achèvement de la première phase du projet de la ligne grande vitesse (LGV) Est européenne en 2007 de la construction de 300 km de ligne nouvelles entre Vaires-sur-Marne (77) et Baudrecourt (57), l'aménagement de l'infrastructure des 106 km s'est poursuivi avec la seconde phase entre Baudrecourt (Moselle) et Vendenheim (Bas-Rhin). La mise en service étant prévue au printemps 2016.

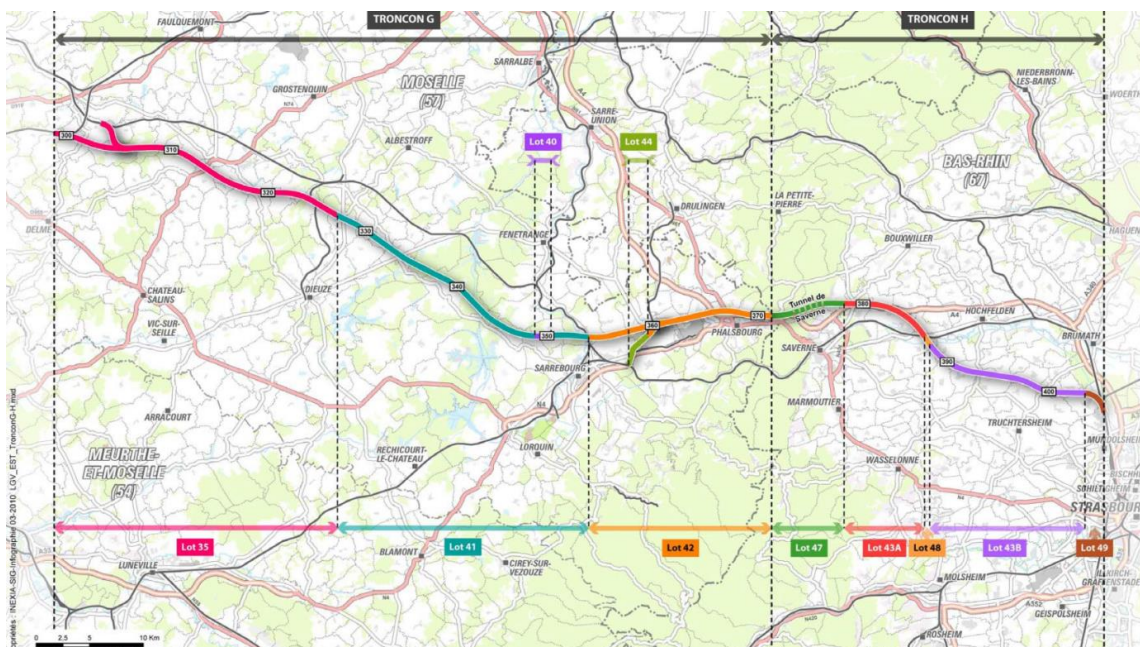


Figure 1: Découpage de la LGV Est 2ème phase.

La seconde phase de la ligne se compose de deux tronçons G et H découpés en 5 lots chacun. Le premier se situe entre Baudrecourt et Danne-et-Quatre-Vents, d'une longueur de 71 km et le second dans le Bas-Rhin correspond à la partie alsacienne du tracé jusqu'à Vendenheim, d'une longueur de 35 km. La phase 2 est un vaste ouvrage de terrassement (18,5 millions de m3 de déblai et 13 millions de m3 de remblai) dans lequel s'insèrent de grands ouvrages d'arts, 102 ouvrages d'arts courants, 14 Viaducs et un tunnel bi-tube de 4 kms pour le franchissement du massif des Vosges. Pour garantir la qualité et la conformité de l'ouvrage, Réseau Ferré de France (RFF) s'est adjoint un assistant technique



(AMOT) dont la mission est confiée à Tractebel Engineering, qui assure notamment le contrôle technique de la conception et de la réalisation du projet de la Ligne à Grande Vitesse Européenne 2ème phase (génie civil et équipements ferroviaires). L'AMOT assiste également le maître d'ouvrage (MOA) en ce qui concerne le processus d'homologation et d'autorisation de mise en exploitation commerciale de la ligne. Une des missions clé de l'AMOT est d'approuver la démarche et le suivi de la gestion des cavités sur la totalité de la ligne.

2. Méthodologie employée pour la recherche des cavités en phase étude

Une partie importante des terrains traversés par le projet LGV Est européenne 2ème phase présente un risque potentiel de présence de cavités. Ces cavités peuvent avoir une origine naturelle, liée aux conditions géologiques (calcaires, gypse, anhydrite,...) ou une origine anthropique (exploitations souterraines, vestiges de guerre). Au cours des phases APD/PRO, les risques liés à la présence de cavités ont été appréhendés et étudiés.

2.1. Recherche de cavités

La recherche de cavités repose essentiellement sur quatre grands axes d'étude:

- La recherche documentaire et de voisinage: elle consiste à étudier et analyser des archives, à réaliser des enquêtes auprès d'organismes et administrations compétents et des associations de spéléologie, à étudier et à interpréter des cartes géologiques, à enquêter auprès des mairies, des entreprises d'extraction, d'exploitations agricoles.
- L'analyse des photographies aériennes: lors des survols en hélicoptère, ou de clichés de télédétection par laser ou de type LIDAR (Light Detection And Ranging) apporte des renseignements dans les domaines : de la nature et les limites des différents terrains; de l'hydrologie (présence de zones humides, sources); des zones d'effondrement liées à une cause naturelle (réseaux karstiques, phénomènes de dissolution) ou artificielles (exploitations souterraines).
- Les investigations par méthodes géophysiques: elles permettent de rechercher la confirmation de la présence de cavités et d'en préciser la profondeur et les dimensions. Les techniques principalement utilisées sur la ligne sont : les méthodes électromagnétiques dites EM34, les panneaux électriques, le radar géologique et la micro-gravimétrie.
- Les sondages de reconnaissance géotechnique: Les sondages de reconnaissance des sols, réalisés soit dans le cadre des campagnes générales des phases d'étude APD et PRO, soit de manière spécifique pour rechercher la confirmation de la présence d'un vide, représentent une méthode complémentaire de détection de cavités. Une analyse particulière des paramètres de forage permet une interprétation en termes de présence ou non d'un vide dans le sous-sol au droit du sondage.

2.2. Synthèse du risque cavités avant travaux

Le risque cavité par tronçon a été évalué en pourcentage du linéaire du lot et du linéaire du tronçon sur les graphiques de la figure 2.

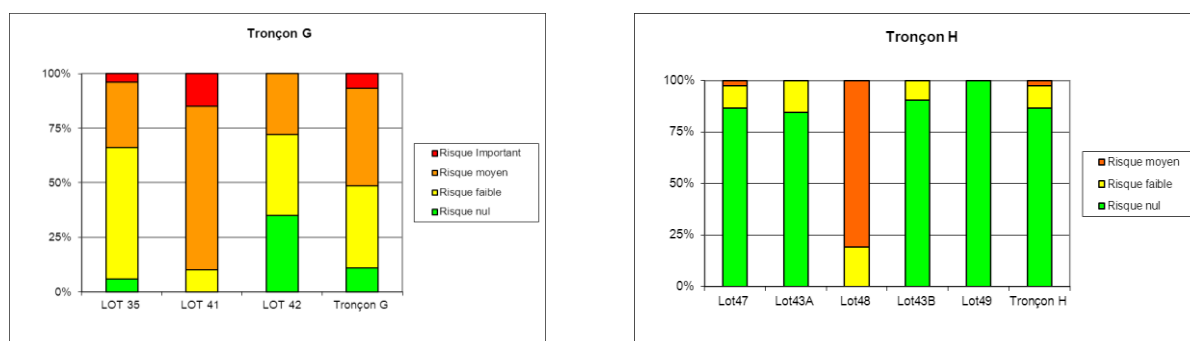


Figure 2: Risque cavité par lot et par tronçon.

Sur le tracé de la LGV Est Phase 2, le risque cavité est globalement faible à modéré hormis très localement.

Le principe retenu des dispositions constructives dans la prise en compte de l'aléa cavité en phase exécution consiste à :

- combler les cavités à chaque fois que cela est possible (exigence de l'IN 3278),
- imperméabiliser les fossés et la PST pour les déblais dans les zones ayant un risque moyen à fort.

3. Méthodologie à suivre en phase chantier

3.1. Exigence du référentiel Technique IN 3278

Le référentiel prescrit que : "Les cavités sont comblées chaque fois que cela est possible et compatible avec le risque lié à la modification des circulations d'eaux souterraines. Il est important d'éviter les infiltrations d'eaux superficielles dans les zones susceptibles de receler des cavités. Le remblaiement des cavités découvertes est exécuté en matériau non érodable dont le module de déformation en place est proche de celui du sol naturel." Le référentiel précise également que les fossés doivent être revêtus de béton coulé en place dans les zones karstiques et à risque cavités.

3.2. Procédure "Suivi et traitement des cavités" de RFF

RFF a établi une procédure « Suivi et traitement des cavités » et a demandé aux MOE-GC (maitre d'œuvre - génie civil) de l'intégrer dans leurs procédures de gestion du risque cavités en phase travaux. Cette procédure permet :

- de définir le processus des opérations à entreprendre lors de découverte d'anomalie pendant la réalisation des travaux ;
- de définir les modalités de transmission des informations et des documents entre l'entrepreneur, le maître d'œuvre (MOE) et le MOA ;
- de définir les modalités d'analyses des résultats par le MOE;
- de déterminer le processus de décisions pour la poursuite des investigations ou le traitement des cavités;
- de fixer les différentes étapes nécessitant des échanges techniques entre le MOE, l'entreprise et le MOA afin de permettre au MOE de définir et d'engager, dans les

délais compatibles avec les marchés de travaux, les traitements éventuellement nécessaires dans les secteurs d'aléa cavité.

3.2.1. Déroulement de la Procédure

Le déroulement de la procédure nécessite d'alimenter quatre types de fiches cavité: Fiche d'identification d'une cavité ou d'un indice de cavité; Fiche navette cavité; Fiche technique « investigations »; Fiche technique « traitement des cavités ».

Chaque fiche d'identification cavité constitue la base d'un dossier propre à chaque cavité ou indice de cavité détecté dont la compilation par lot ou tronçon viendra alimenter le dossier de récolement du secteur concerné.

Ce dossier contient tous les éléments traduisant tout le processus de décision depuis la découverte jusqu'à la reprise des travaux.

3.2.2. Organigramme

La mise en application de la procédure cavité doit respecter l'organigramme de la figure 3, qui fait intervenir les différents acteurs Entreprise/MOE/MOA-AMOT.

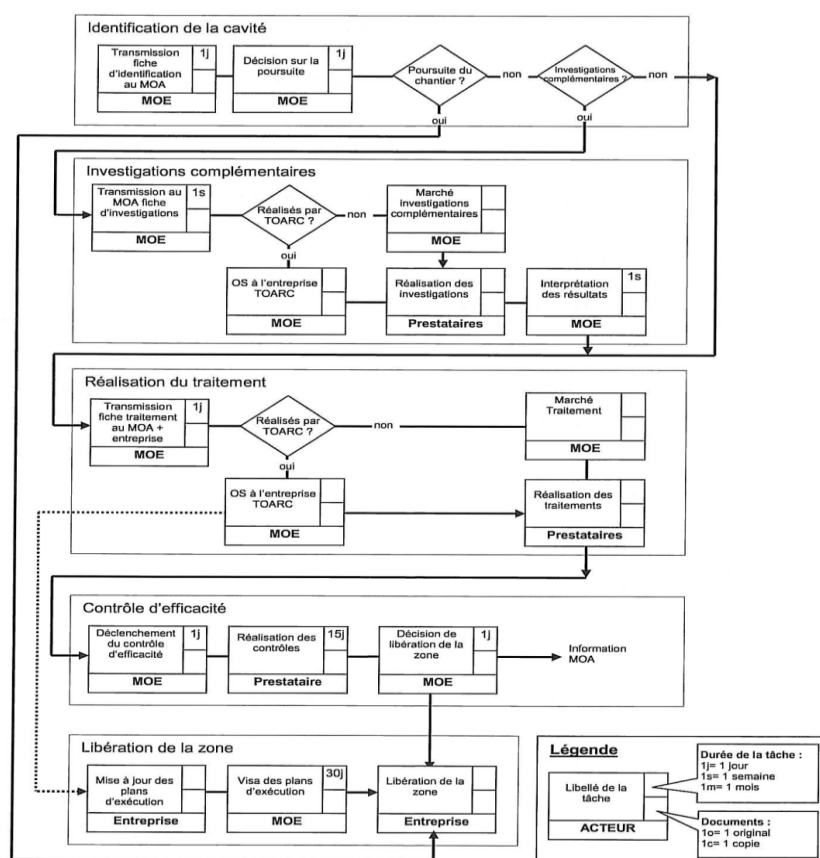


Figure 3: Organigramme de la procédure cavité de RFF.

4. Application de la procédure cavité sur le lot 35

4.1. Contexte géologique du lot 35

Une partie importante des terrains traversés par le lot 35 s'inscrit dans les formations géologiques des Marnes Irisées Supérieures et des argiles de Chanville.

Les argiles de Chanville du Keuper supérieur, correspondent à une formation marno-argileuse contenant du gypse et de l'anhydrite, constituant ainsi la formation la plus critique. Au toit de cette formation, le gypse peut se présenter sous forme de bancs pluri-décimétriques, de lentilles ou d'amas diffus.

La découverte d'anomalies en forages et de cavités lors du terrassement, a conduit le concepteur/réalisateur à l'ouverture de fiche cavité et à déclencher la mise en application de la procédure MOA sur le suivi et sur le traitement des cavités mises en évidence au droit du lot 35. Au total une douzaine d'ouvrage en terre sont concernés.



Figure 4: Présence du gypse sur le talus et cavité repérée sur le lot 35.

4.2. Traitement du déblai DBT 547

Dans ce paragraphe, seront rappelées les dispositions constructives prises en compte pour le traitement des anomalies rencontrées sur le déblai DBT 547 d'une longueur de 942m.

Les reconnaissances complémentaires ont consisté à la réalisation d'une cinquantaine de sondages destructifs et des reconnaissances géophysiques EM34 et microgravimétrie.

Elles ont mis en évidence des vides pluridécimétriques à métriques à des faibles profondeurs et en profondeur, avec des alternances de terrains durs et mous.

Compte tenu de la nature aléatoire des anomalies rencontrées sur la majorité de ce déblai, cet ouvrage a fait l'objet d'un traitement systématique sur environ 90% de son linéaire. Le reste du linéaire est concerné par 2 zones de traitements ponctuels au droit des anomalies.

4.2.1. Déroulement de la phase de traitement par injection

Le traitement a consisté à combler sous pression par injection les terrains suivant une maille de 5m x 5m de manière à traiter les vides francs.

Les injections ont été conduites selon les critères d'arrêt à savoir résurgence terrain ou atteinte d'un palier pression de 4 bars.

Le coulis de traitement injecté est un coulis composé de ciment (15%) et de cendres volantes, nommé Complex 85.

Le volume total de coulis injectés dans l'ensemble des 524 forages de traitement du déblai DBT547 est de 1 352 m³, ce qui représente en moyenne 2,6 m³ de coulis par forage.

Sur le schéma ci-dessous sont répertoriés les volumes injectés.

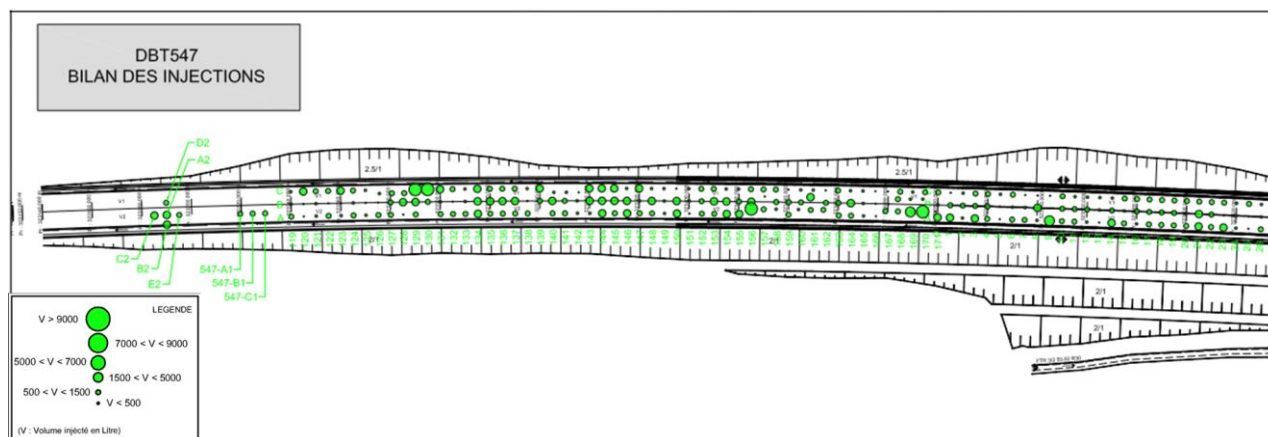


Figure 5: Extrait du bilan des injections du DBT 547

4.2.2. Sondages de contrôle (internes et extérieur)

Afin d'évaluer l'efficacité du traitement, des sondages de contrôle (internes et extérieur) ont été réalisés. Certains sondages ont mis en évidence des anomalies résiduelles de type vide franc. Suite aux résultats, il a été convenu de réaliser des injections en deux temps par injection gravitaire jusqu'à la résurgence (avec un critère d'alerte équivalent à deux fois le volume théorique d'un forage de 20m, soit de 500l/trou de forage) suivi par le clavage des terrains par des injections sous pressions jusqu'à l'obtention de 4 bars de pression. Les sondages d'injection de contrôle ont été réalisés autour des forages pour lesquels un doute sur l'efficacité du traitement pourrait subsister. Le forage suspect est circonscrit par 4 forages situés à 2,5m du sondage de contrôle.

4.3. Synthèse sur la gestion des cavités du DBT 547

Le traitement de la zone a nécessité de procéder à des forages principaux, secondaires et tertiaires lorsque le dépassement du seuil d'alerte était atteint (500l/forage).

En plus du traitement, une purge de 2m d'épaisseur a été réalisée au niveau de la PST où la présence du gypse a été localisée en surface et substituée en matériaux peu perméables sur l'ensemble du DBT 547.

Grâce à l'ensemble des mesures de traitement mises en œuvre, le risque cavité du DBT 547 a été requalifié en risque faible.

5. Application de la procédure cavité sur le lot 42

5.1. Contexte géologique du lot 42

Initialement le risque cavité du lot 42 était classé en moyen dans les formations géologiques des Couches Grises et des Marnes Bariolées du Muschelkalk (associé à la dissolution potentielle des niveaux évaporitiques : gypse et anhydre) et dans les Couches Blanches du Muschelkalk, Calcaires à Entroques et à Cératites du Muschelkalk et dans la Zone Supérieure Dolomitique (dissolution potentielle des calcaire).

La découverte d'anomalies en forages et de cavités lors du terrassement, a nécessité de requalifier certains ouvrages du lot 42 en risque fort (comme le RBT 506). Cette découverte a conduit le MOE à ouvrir des fiches cavité et à déclencher la mise en application de la procédure MOA sur le suivi et sur le traitement des cavités. Au total cinq ouvrages en terre sont concernés sur ce lot.

5.2. Traitement du remblai RBT 506

Le RBT 506 du lot 42 a nécessité une attention particulière vis-à-vis du risque cavité lié à la dissolution du gypse.

5.2.1. Géologie et hydrogéologie de l'assise du RBT 506

La géologie de l'assise de ce remblai est composée de:

- Limons de faible épaisseur;
- Marnes Bariolées altérées avec bancs de gypse à la base altérés et karstiques;
- zone supérieure Dolomitique (substratum).

Au niveau hydrogéologique, la nappe est continue et sub-affleurante. La nappe circule principalement dans le gypse karstique.

5.2.2. Ouverture de la fiche cavité

Au cours des travaux, des cavités ont été rencontrées dans les marnes bariolées avec des remontées de «fontis».



Figure 6: Photos d'un geyser et d'une cavité mis en évidence sur lot 42.

Ces éléments nouveaux ont conduit à l'ouverture d'une fiche cavité. Les investigations complémentaires ont nécessité la réalisation d'une centaine de sondages destructifs avec enregistrement des paramètres de forage, des mesures d'EM34 généralisés sur la totalité du remblai et des mesures géophysiques par panneaux électriques.

Les gypses présents dans les Marnes Bariolées font apparaître par endroit des zones décomprimées mais aussi des vides francs et/ou des cavités parfois effondrées ou partiellement remplies.

Sur la figure 7 sont répertoriés en violet les zones décomprimées et en rose les vides francs.

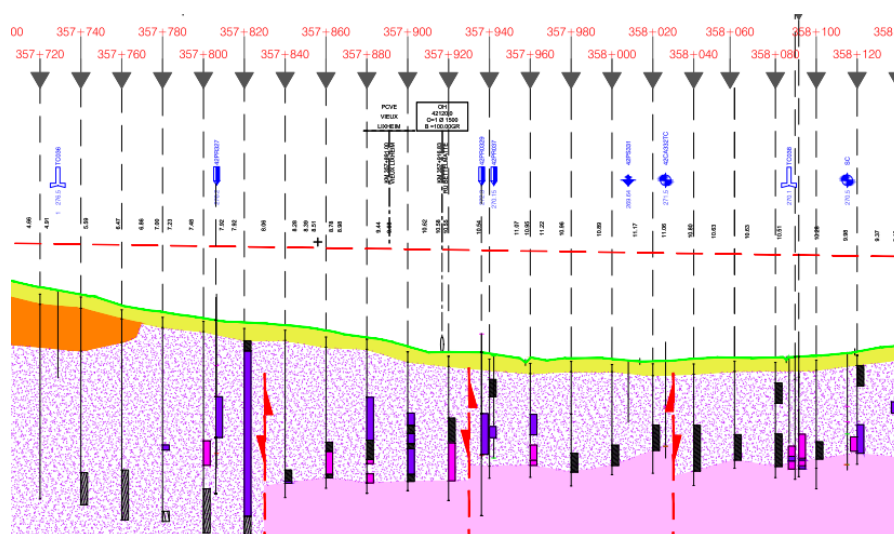


Figure 7: Extrait de l'implantation des sondages destructifs du RBT 506

Ces reconnaissances complémentaires ont montré qu'il existe un véritable réseau «karstique» à la base des Marnes Bariolées, les cavités étant reliées entre elles par des conduits.

5.2.3. Traitement du RBT 506

A l'issu de ces investigations complémentaires, le RBT 506 a été découpé en plusieurs zones selon la concentration des vides francs rencontrés et les zones décomprimées.

Le traitement de l'ouvrage en terre a été réalisé de la manière suivante :

- par le comblement des vides par injection systématique de remplissage dans les zones à forte concentration de vides;
- en dehors des zones faisant l'objet d'un traitement systématique, et faisant apparaître quelques vides francs et des zones décomprimées: par le comblement des vides « isolés » par un maillage d'injections « ponctuelles » et la mise en place d'un géosynthétique de renforcement (type Goelon PET 800) à la base du remblai au sein d'une couche de matériau dilatant afin de traiter le risque d'affaissement (le rôle du géosynthétique est de ponter les éventuels affaissements et de diminuer et d'étaler les déformations).

-En ce qui concerne le traitement des ouvrages d'art et des ouvrages hydrauliques : par le traitement par injections de comblement de remplissage des vides repérés et par inclusions rigides descendues au toit de la Dolomie.

5.2.4. Déroulement de la phase traitement par injection

Le maillage des forages, les caractéristiques du coulis injecté et les conditions d'injection doivent permettre de remplir le maximum de vides tout en empêchant le coulis de migrer en dehors des zones à traiter.

-Pour la phase de comblement systématique par injection des vides francs, le maillage primaire systématique mis en œuvre est de 7m x 7m. Le maillage secondaire 5m x 5m puis tertiaire 3,5m x 3,5m sont déclenchés autour de chaque forage lorsque le critère d'arrêt est atteint (volume injecté supérieur à 10 m³).

-Pour la phase du comblement ponctuel, le maillage 5 m x 5 m autour de l'anomalie est retenu.

Le coulis mis en œuvre est de type bentonite-ciment-sablon pour les zones systématiques et du bentonite-ciment-filler pour les zones ponctuelles. L'injection s'est faite en deux phases: une première phase de remplissage gravitaire et une deuxième phase de clavage sous faible pression (5 bars).

Le traitement des 1700 m du RBT 506 a nécessité près de 3400 forages et 35000m³ de coulis injectés et la réalisation d'environ 1300 inclusions rigides.

Une étude hydrogéologique a été menée afin de vérifier l'impact des travaux d'injection sur le niveau de la nappe et son potentiel de dissolution. Les conclusions de cette étude ont confirmé que l'hydrogéologie n'a pas été impactée par ces injections.

Grâce à l'ensemble des mesures de traitement mises en œuvre, le risque cavité du remblai 506 a été requalifié en risque faible.

6. Discussion et Conclusion

Le MOA s'est trouvé confronté au problème de la prise en compte de la forte solubilité des roches gypseuses qui évoluent à l'échelle de temps humaine. Les cavités qui en résultent en présence des circulations d'eau ont provoqué des fontis et la présence de zone très décomprimées. Afin de garantir la pérennité de l'ouvrage tout au long de la durée de vie de la ligne, le MOA a veillé à prendre toutes les précautions vis-à-vis de ce risque. Les exigences du référentiel technique IN 3278 et la procédure du MOA ont été correctement appliquées par tous les intervenants. Sur la base des deux exemples présentés qui caractérisent deux problèmes différents de dissolution de gypse (un conduisant à des vides francs volumineux et l'autre à un système majoritairement de cavités de petites tailles dissymétriques et des zones décomprimées), la pertinence de la procédure a été confirmée pour le traitement des risques cavités sur la LGV Est 2ème phase. La méthodologie adoptée et le suivi/contrôle par l'AMOT ont permis d'apporter au MOA les garanties de traitements conformément aux attentes. Le risque cavité a pu alors être requalifié en faible.

La réalisation d'une instrumentation permettant le suivi ultérieur de l'ouvrage et donc de couvrir les risques résiduels de dissolution ultérieure du gypse est assurée et complétée par des reconnaissances géoradar permettra la détection d'anomalies sous la structure ferroviaire avant toute déformation au niveau de ZRail (altitude du rail).

Références bibliographiques

Alezais R., Chardard P., Druite A. (2013). Synthèse cavité DBT 547. Eiffage TP.

Bort M., Poinas, M., Lefebvre A., B. Gosselin (2012). Problématique "Dissolution du Gypse-RBT506". INEXIA-ARCADIS.

IN3278 (2006). Référentiel Technique pour la réalisation des LGV - Partie Génie Civil, Emetteurs: Réseau Ferré de France / SNCF.

Jacquier P., Thomas D., Cuccaroni A. (2009). Procédure suivi et traitement des cavités, P2030pj Traitement des cavités.