

TRAMWAY DE VALENCIENNES : UNE SOLUTION INNOVANTE DE TRAITEMENT DU RISQUE « CAVITES SOUTERRAINES ».

VALENCIENNES TRAMWAY: AN INNOVATIVE SOLUTION FOR THE MANAGEMENT OF « UNDERGROUND QUARRIES » RISK

Pierre GUERIN¹, Erwan MOAL¹ et Stéphane CURTIL¹,
¹ *GEOS Ingénieurs Conseils, Rueil-Malmaison, France*

RÉSUMÉ – Lors de la construction de la ligne 2 du tramway de Valenciennes, un secteur de 1 km présentant des anciennes carrières de craie a été identifié. Pour éviter le risque de fontis, il a été nécessaire de combler ces cavités par injections. GEOS Ingénieurs Conseils a défini une solution innovante permettant de traiter les cavités et les anomalies de compacité sous la plateforme du tramway tout en maîtrisant les pertes latérales.

ABSTRACT – During the construction of line 2 of the Valenciennes tramway, a 1 km has been identified where underground chalk quarries can be encountered. To prevent the cave-in hazard, these chalk quarries must be filled by grout injection. GEOS Ingénieurs Conseils designed an innovative solution to fill the cavities and to handle compactness anomalies under the tramway platform while managing the grout injection losses outside the tramway platform.

1. Présentation générale du projet

La ligne 2 du tramway permettra de relier Valenciennes au Pays de Condé grâce à un tracé en voie unique de 15,5 km qui empruntera la RD 935 sur la majeure partie de l'itinéraire. De Valenciennes à Escautpont, le tramway empruntera l'avenue Jean Jaurès pour ensuite longer l'ancien lit de l'Escaut, à l'arrière de Fresnes sur Escaut. Cette liaison permettra de desservir 7 communes (Valenciennes, Anzin, Bruay-sur-l'Escaut, Escautpont, Fresnes-sur-Escaut, Condé-sur-Escaut et Vieux-Condé), soit une population de 59 000 habitants.

L'exploitation en voie unique permettra de maintenir un stationnement bilatéral sur la majeure partie du tracé.

2. Contexte géotechnique

Le contexte géotechnique du secteur est celui d'un coteau crayeux sur la berge Ouest de l'Escaut.

Le substratum est constitué de craie blanche du Sénonien puis de craie grise du Turonien supérieur. Ces formations sont surmontées par une couche tertiaire du Landénien (sable vert de Grandglise et tuffeau de Valenciennes) et par une couche de remblais.

La craie a fait l'objet d'une exploitation en carrières souterraines (catiches – figure 1) à l'époque médiévale, pour la fabrication de chaux (craie blanche) ou de pierre de construction (craie grise).



Figure 1. Carrière souterraine sous la ligne de Tramway.

Cette exploitation, par chambres et piliers, s'est développée dans une relative anarchie de telle sorte qu'il est probable de rencontrer des cavités sur l'ensemble du secteur (figures 2 et 3).

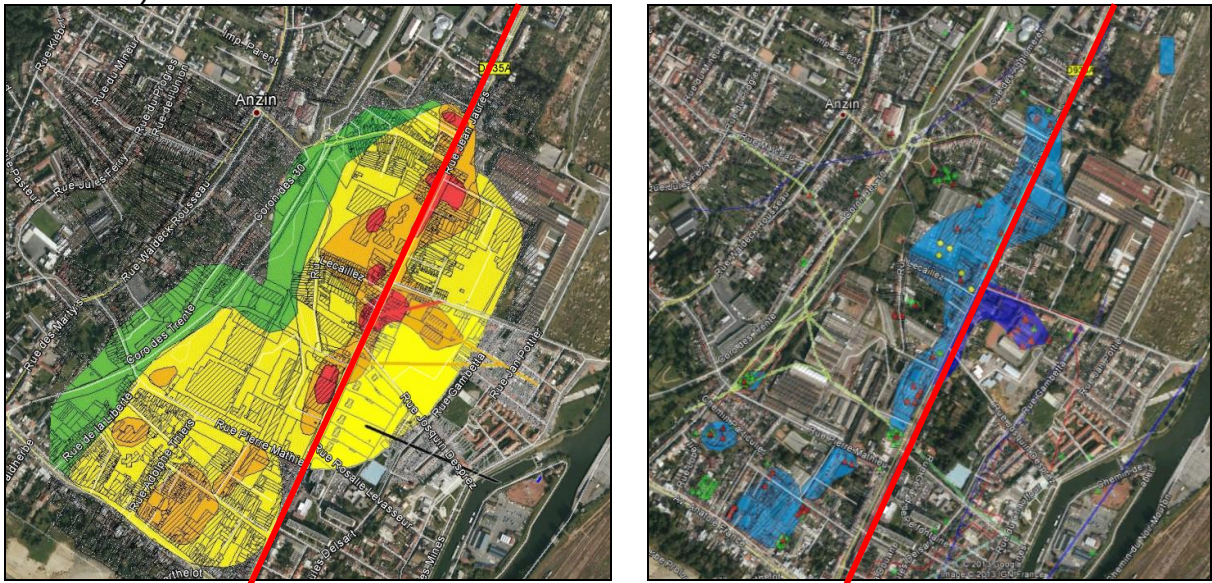


Figure 2 et 3. Aléa cavité : faible à moyen (vert à rouge) - Carte de zonage des carrières abandonnées connues

La présence de la nappe phréatique vers 15 à 20 m de profondeur constitue le plancher bas des exploitations qui sont établies à une profondeur ne dépassant pas 15 m.

De nombreux effondrements ont été constatés depuis le 18^e siècle jusqu'à récemment dans le secteur traversé par la ligne 2 du tramway. Le Plan de Prévention des Risques Mouvements de Terrain pour la région du Valenciennois inclut le secteur du tramway. Le niveau de risque est qualifié de moyen ce qui implique, pour les nouveaux projets, des dispositions constructives à définir après évaluation du niveau de risque par des reconnaissances in situ.

3. Reconnaissances géotechniques

En juillet 2012, les reconnaissances suivantes ont été réalisées :

- 115 sondages destructifs à 20 m de profondeur avec mesure des paramètres de forages (1 unité / 10 m),
- 5 profils radar de 1100 m,
- 25 inspections vidéo en forage,
- examen des cartes et données d'archives.

La présence d'anomalies de type vides francs et zones décomprimées dans le sous-sol, et un niveau de risque important ont ainsi été confirmés.

En mars 2013, les reconnaissances complémentaires suivantes ont été réalisées pour fiabiliser les résultats de la première campagne et préciser le niveau de risque sur certains secteurs :

- 57 sondages destructifs à 20 m de profondeur avec mesure des paramètres de forages (1 sondage tous les 10 m à l'inter-maille de la 1ère campagne),
- 12 sondages avec essais pressiométriques dans les horizons décomprimés identifiés lors de la 1ère campagne. Le contexte géotechnique du secteur est celui d'un coteau crayeux sur la berge Ouest de l'Escaut.

4. Analyse des reconnaissances

A l'issue de la première campagne de reconnaissance (2012) GEOS Ingénieurs Conseils a réalisé une analyse du risque cavité souterraine sur le tronçon étudié (zonage du risque). Les reconnaissances ont permis d'identifier trois configurations principales dans le sous-sol :

- Aucune anomalie identifiée (sous-sol sain)
- Présence de sols décomprimés
- Présence de vide(s) franc(s)

Ces anomalies ont été reportées sur un profil en long du tronçon de tramway étudié afin d'identifier de façon globale les zones à traiter et les possibilités d'optimisation (figure 4).

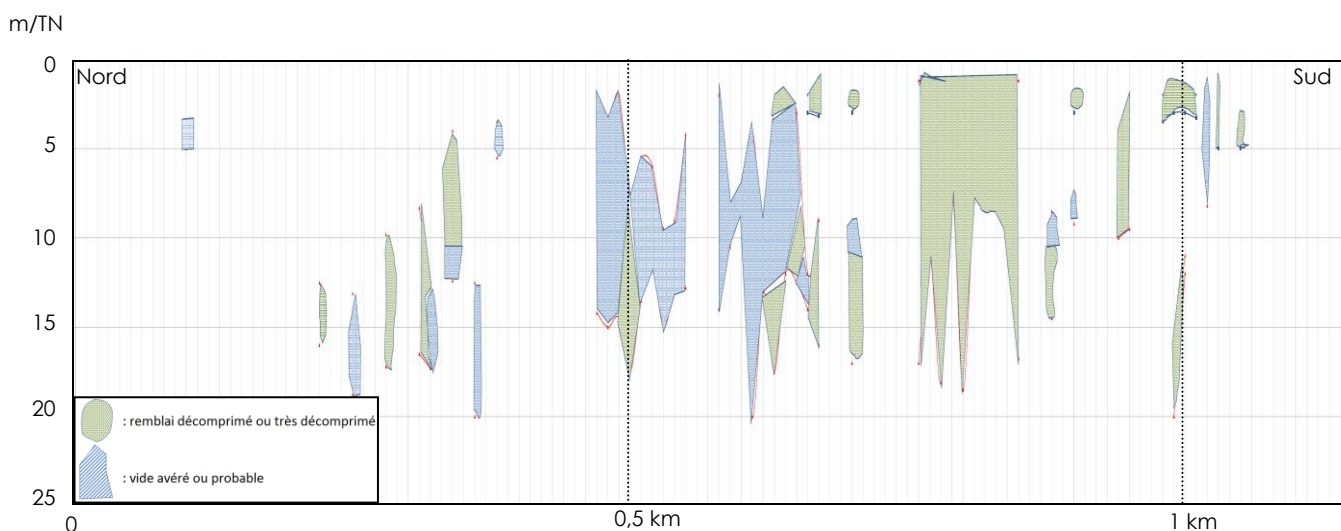


Figure 4. Profil en long des anomalies de la 1ère campagne de reconnaissance

5. Solutions de traitement

En fonction des trois configurations définies précédemment, de la densité de sondages ayant détecté des anomalies et du niveau d'aléa défini au PPRMNT, une première solution de traitement a été établie avec des adaptations aux types d'anomalies rencontrés :

- 1) aucun traitement si aucune anomalie n'est rencontrée et que la densité de sondages dans la zone concernée est suffisante pour éliminer le risque de remontée de fontis de grandes dimensions (190 m de linéaire projet)
- 2) réalisation d'une plateforme de tramway « renforcée » par dalle en béton armée dans les zones d'anomalies diffuses avec un risque de présence de carrières non localisées (260 m de linéaire projet),
- 3) consolidation des sols décomprimés par injection de mortier sous pression (240 m de linéaire projet),
- 4) comblement des vides francs par injection de mortier sous faible pression (310 m de linéaire projet).

La multiplication des solutions techniques rend plus complexe la mise en œuvre et l'adaptation aux conditions géotechniques réelles sur le chantier. Pour limiter les aléas d'exécution, préciser le niveau de risque réel sur certaines zones et optimiser les traitements, une campagne de sondages complémentaires a donc été réalisée début 2013.

Le zonage des risques a été mis à jour après ces sondages complémentaires et la solution de traitement optimisée pour simplifier l'exécution des travaux :

- 1) 620 ml sans travaux spécifiques
- 2) 0 ml de dalle renforcée en béton fortement armée avec remplacement par des injections localisées de mortier sous pression
- 3) 380 ml de consolidation et comblement : les critères d'arrêt d'injection sont établis en fonction du type d'anomalie identifiée lors du forage nécessaire à l'injection.

L'optimisation technique des travaux proposée apporte des avantages économiques par réduction des linéaires traités, de délais par abandon de la solution de renforcement de plateforme par dalle en béton fortement armée et technique car un unique type de matériel et de matériau d'injection est employé pour toute l'opération ; les différences se limitant aux conditions d'injection : pression et débit selon les anomalies identifiées.

La figure 5 ci-après résume la solution proposée avec une consolidation horizontale des horizons peu compacts (formation superficielle, craie altérée ou remblai de craie) et un comblement des cavités franches.

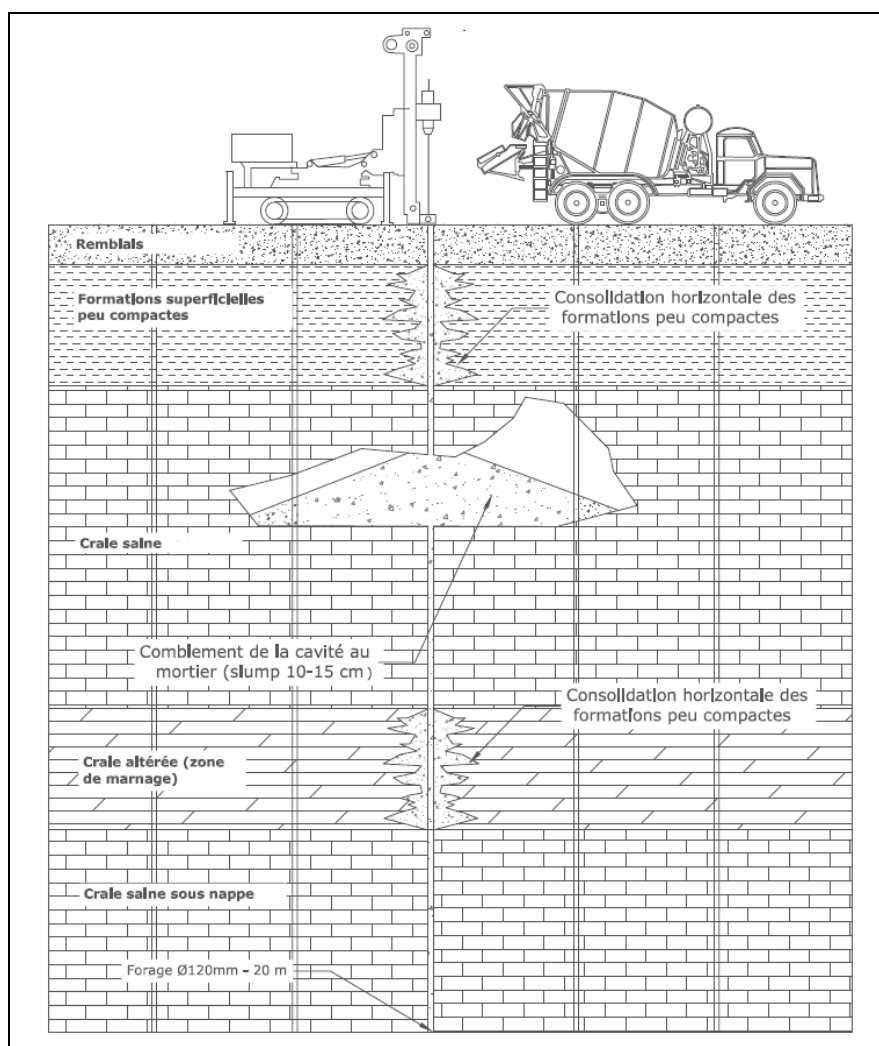


Figure 5. Solution de traitement proposée

Afin de limiter les quantités de mortier à injecter, GEOS a retenu l'emploi d'un mortier de consistance pâteuse pour réaliser de l'injection solide (Slump de 10 à 15 cm maximum). Ce choix permet, dans les zones de cavités franches connectées, d'éviter des pertes latérales importantes en dehors de l'emprise de la plateforme tramway car le mortier forme un cône avec une pente de 15 à 20° environ.

La mise en place d'un coulis « classique » (très fluide) n'aurait pas permis d'assurer la maîtrise des quantités, coûts et délais, sans réaliser au préalable des barrages en souterrain dans les anomalies tout le long du projet ; solution non envisageable pour un projet linéaire où les cavités, leurs dimensions et leur connectivité ne sont pas connues.

6. Suivi des travaux

L'entreprise SOLEFFI TS, sous-traitant du mandataire Eiffage Travaux Publics, s'est vu confier la réalisation des travaux d'injection.

La procédure d'exécution était la suivante :

- Implantation des forages selon un maille 3 m x 2,5 m : 3 lignes de forages en quinconce : une ligne à l'axe de la voie et une ligne en bordure de plateforme,
- Forage à 20 m de profondeur avec mesure des paramètres de forage et interprétation,
- Injection de mortier depuis la base du forage par passes de 0,5 m en respectant les critères d'arrêt adaptés au type d'anomalie identifiée.

Les critères d'arrêt retenus étaient les suivants (vides francs / sols décomprimés) :

- 5 m³ / 0,5 m³ par passe de 0,5 m de haut
- 10 m³ / 5 m³ par forage et par jour
- 0,5 MPa / 1 MPa pour la pression d'injection
- Résurgence en tête

Afin d'assurer la maîtrise des quantités d'injection, le contrôle de la consistance du mortier est essentiel. Des mesures de l'affaissement (Slump) ont été systématiquement réalisées sur chaque toupie de mortier livrée (figure 6). Plusieurs toupies ont été refusées en début d'opération.



Figure 6. Essai d'affaissement

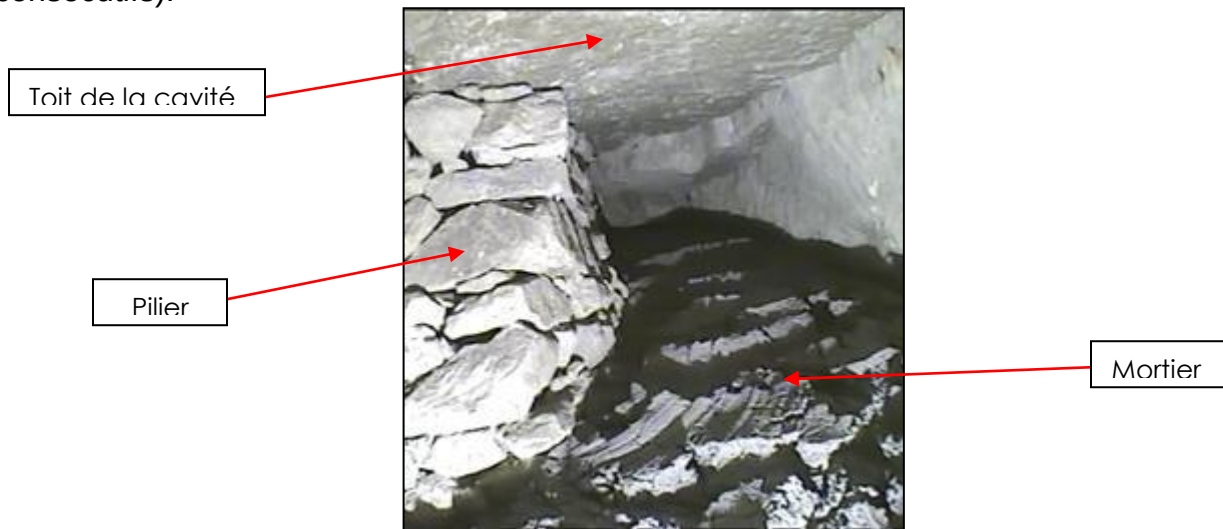
En cas d'anomalie majeure rencontrée en forage (vide franc supérieur à 2 m de hauteur), une inspection vidéo a été réalisée pour analyser la configuration et observer l'état du toit des cavités en particulier.

Des fractures importantes ont pu être observées au niveau du toit de plusieurs cavités (figure 7 et 8).



Figures 7 et 8. Carrière souterraine – Fractures du toit

Ces inspections ont permis également de visualiser le comportement du mortier dans les cavités. Le mortier forme un cône confirmant la bonne maîtrise, par cette technique, des pertes latérales en dehors de l'emprise des travaux (figure 9) et le bon dimensionnement de la maille de forage (recouvrement partiel des cônes d'injection entre deux forages consécutifs).



Figures 9. Cône de mortier en place

7. Bilan des travaux

Les travaux se sont déroulés de mars à juin 2013 avec la réalisation d'un 1er tronçon de 250 ml situé entre le n°106 et le n°160 de l'avenue de Condé. Puis, à partir de fin avril, une deuxième phase de travaux a débuté avec plusieurs tronçons plus courts situés au Nord et au Sud du 1er tronçon.

Avant travaux, l'estimation par des quantités de mortier à injecter était la suivante :

- environ 2000 m³ pour le premier tronçon (1ère phase)
- entre 500 et 800 m³ pour l'ensemble de la 2e phase.

Un système de suivi précis des volumes injectés a été mis en place pour garantir la maîtrise des quantités, coûts et délais avec notamment l'utilisation d'un outil de comparaison de l'analyse préliminaire des anomalies et des quantités réelles injectées. On observe sur la figure 10 que les sondages où les plus gros volumes ont été injectés (en rouge sur les trois profils du bas) correspondent aux forages de reconnaissance préalable avec des anomalies de type vide ou quasi-vide (en rouge sur le premier profil en haut).



Figures 10. Extrait du fichier de suivi des volumes injectés
(vert : volume injecté faible ; rouge : volume injecté élevé)

L'interprétation initiale des anomalies a donc été confirmée par les travaux. En fin de chantier, les volumes injectés sont de 1793 m³ pour la 1ère phase et de 774 m³ pour la 2e phase, soit des écarts de l'ordre de 10 % par rapport à l'estimation initiale.

Les principales caractéristiques du chantier sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 1. Données du chantier

Linéaire de voie traitée	380 m pour 830 m de projet en zone PPRMT
Forages	396 unités et 7920 ml
Volume total injecté	2567 m ³
Volume moyen/min/max par forage	6,5 m ³ / 0,7 m ³ / 39 m ³
Traitement	1,3 m ³ de mortier /m ² de plateforme
Durée	15 semaines

8. Conclusions

La technique de traitement des cavités et anomalies de compacité proposée était donc bien adaptée au contexte géologique et géotechnique du site puisque les deux objectifs principaux définis avant le démarrage des travaux ont été parfaitement remplis :

- Traiter les anomalies pour réduire le risque lié à l'aléa cavité souterraine à un niveau acceptable.
- Maîtriser les quantités injectées, les coûts et les délais.

5. Références bibliographiques

Préfecture du Nord – Direction départementale de l'Equipement (21 janvier 2008). *Plan de Prévention des Risques de Mouvements de Terrain (PPRMT) du Valenciennois*.