

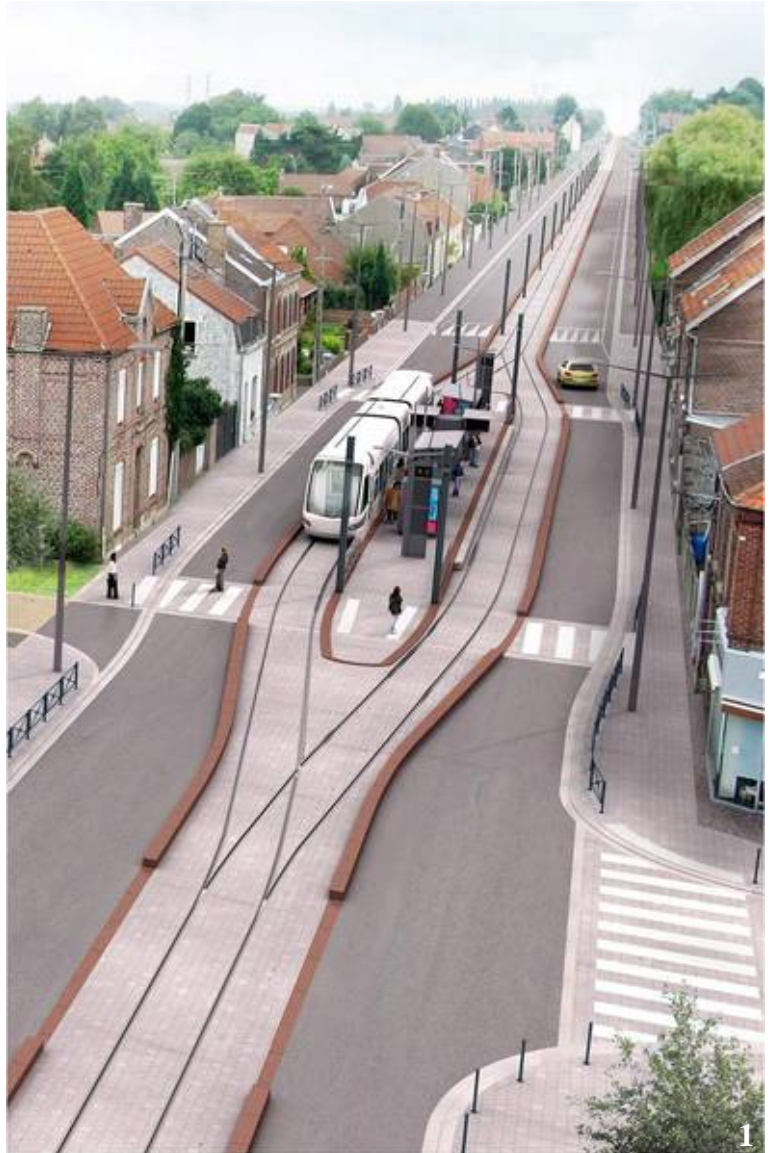
TRAMWAY DE VALENCIENNES : MAÎTRISE DE L'ALÉA « CARRIÈRES SOUTERRAINES » SOUS UN PROJET LINÉAIRE

TRAMWAY DE VALENCIENNES LIGNE 2 - VALENCIENNES / VIEUX-CONDÉ

AUTEURS : STÉPHANE CURTIL, DIRECTEUR, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - PIERRE GUÉRIN, INGÉNIEUR, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - ERWAN MOAL, INGÉNIEUR, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

DANS LE CADRE DES TRAVAUX DE CONSTRUCTION DE LA LIGNE 2 DU TRAMWAY DE VALENCIENNES SOUS MAÎTRISE D'OUVRAGE DU SITURV, UN SECTEUR DE 1 KM PRÉSENTANT UN RISQUE IMPORTANT LIÉ À L'ALÉA CAVITÉ SOUTERRAINE (ANCIENNES CARRIÈRES DE CRAIE : « CATICHES ») A ÉTÉ IDENTIFIÉ. CES CAVITÉS NE SONT PAS ACCESSIBLES ET FORMENT UN RÉSEAU CONNECTÉ. DANS CES CONDITIONS, LE TRAITEMENT DE L'ALÉA EST PARTICULIÈREMENT DIFFICILE POUR RÉDUIRE SIGNIFICATIVEMENT LE RISQUE DE FONTIS TOUT EN MAÎTRISANT LES COÛTS LIÉS AUX QUANTITÉS D'INJECTION À METTRE À ŒUVRE DANS UN CONTEXTE OÙ LES PERTES LATÉRALES EN DEHORS DE L'EMPRISE DU TRAMWAY PEUVENT ÊTRE TRÈS IMPORTANTES.

GEOS INGÉNIEURS CONSEILS A DÉFINI UNE SOLUTION DE TRAITEMENT DES CAVITÉS ET DES ANOMALIES DE COMPACITÉ GARANTISSANT LA PÉRENNITÉ DE LA PLATEFORME DU TRAMWAY TOUT EN LIMITANT LES VOLUMES D'INJECTIONS AU STRICT NÉCESSAIRE.



© SITURV



© Image Entreprise JOLY Ets

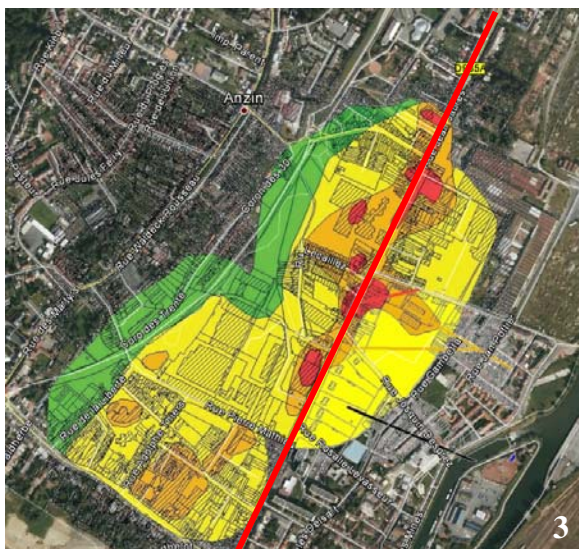
PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

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- Carrière souterraine sous la ligne de tramway

2 - Underground quarry below the tramway line



© Superposition PPRMT / photographies aérienne Google Earth

3 - Aléa cavité : faible à moyen (vert à rouge)
 4 - Carte de zonage des carrières abandonnées connues

3 - Cavities hazard zone : low to medium (green to red)
 4 - Abandoned Underground quarries zoning map.

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) à l'époque médiévale, pour la fabrication de chaux (craie blanche) ou de pierre de construction (craie grise).

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 3 et 4). 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 (PPRMT) 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.

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 1^{ère} campagne)
- 12 sondages avec essais pressiométriques dans les horizons décomprimés identifiés lors de la 1^{ère} campagne.

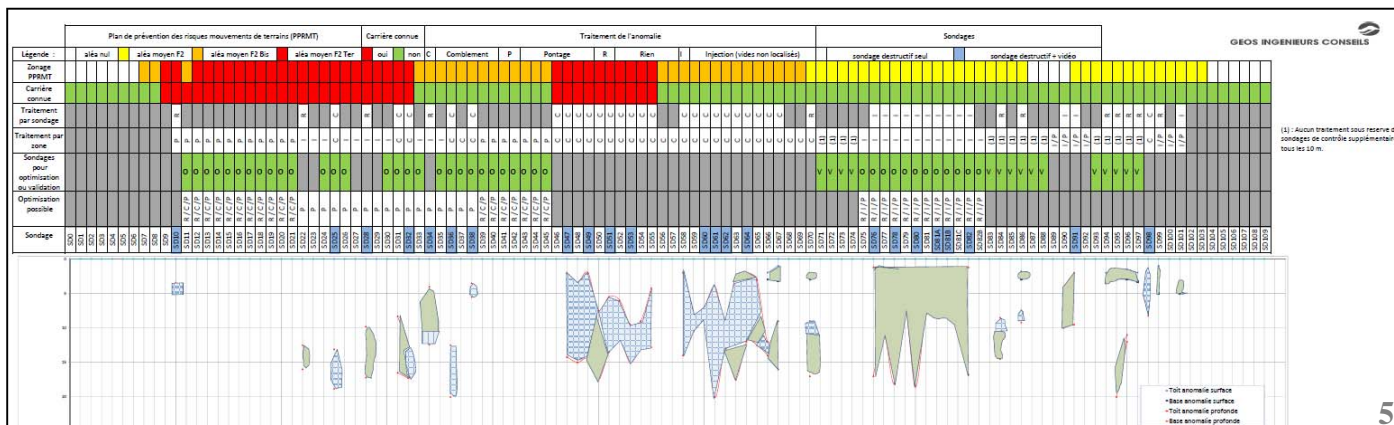
ANALYSE DES RECONNAISSANCES

A l'issue de la première campagne de reconnaissance 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 5).

5 - Profil en long des anomalies de la 1^{ère} campagne de reconnaissance
 5 - Longitudinal profile where deficiencies of the 1st investigations are identified



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 été réalisée début 2013.

6 - Sondage complémentaire (GINGER CEBTP)

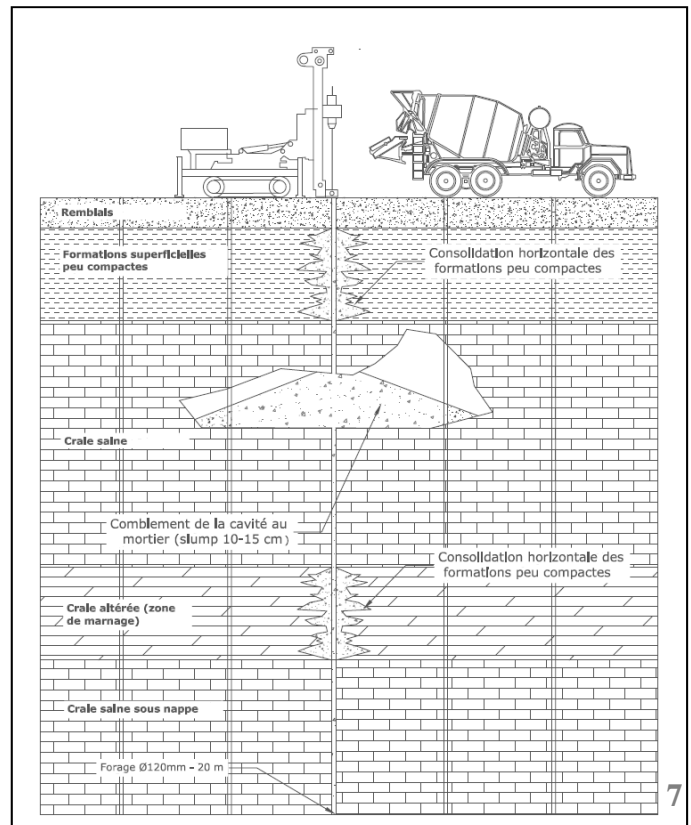
6 - Additional borehole (GINGER CEBTP)



© Photothèque GEOS Ingénieurs Conseils

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



© GEOS Ingénieurs Conseils

d'anomalie identifiée lors du forage nécessaire à l'injection.

L'optimisation technique des travaux proposée par GEOS 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 7 ci-dessus résume la solution proposée par GEOS avec une consolidation horizontale des horizons peu compacts (formation superficielle, craie altérée ou remblai de craie) et un comblement des cavités franches.

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.



© Photothèque GEOS Ingénieurs Conseils



9 - Foreuse
10 - Livraison de mortier
11 - Essai d'affaissement
12 - Dispositif d'injection

9 - Drilling machine
10 - Delivery of concrete
11 - Slump test
12 - Injection system

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 11). Plusieurs toupies ont été refusées en début d'opération.

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. 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 15) et le bon dimensionnement de la maille de forage (recouvrement partiel des cônes d'injection entre deux forages consécutifs).



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



13-14 :
Carrière souterraine -
Fractures du toit
15 - Mortier en place dans la cavité

13-14 :
Underground quarry -
Cracks in quarry roof
15 - Concrete in the cavity



BILAN DES TRAVAUX

Les travaux se sont déroulés de mars à juin 2013 avec la réalisation d'un 1^{er} 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 1^{er} tronçon.

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

- environ 2000 m³ pour le premier tronçon (1^{ère} phase)
- entre 500 et 800 m³ pour l'ensemble de la 2^e 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 16 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).

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 1^{ère} phase et de 774 m³ pour la 2^e phase, soit des écarts de l'ordre de 10 % par rapport à l'estimation initiale.

La technique de traitement des cavités et anomalies de compacité proposée par GEOS Ingénieurs Conseils était donc bien adaptée au contexte géologique et géotechnique du site.

Les deux objectifs principaux définis avant le démarrage des travaux ont été parfaitement remplis :

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

16 - Extrait du profil en long des lignes d'injection

16 - Extract from the longitudinal profile of the injection lines

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 m³
Volume moyen / min / max : 6,5 m³ / 0,7 m³ / 39 m³
Traitement : 1,3 m³ de mortier / m² de plateforme
Délai : 15 semaines

PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage : SITURV
Maître d'œuvre général : INGEROP
Maître d'œuvre géotechnique : GEOS Ingénieurs Conseils
Entreprise principale : EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS
Entreprise réalisant les injections : SOLEFFI TS

ABSTRACT

TRAMWAY OF VALENCIENNES : CONTROLLING THE UNDERGROUND CAVES RELATED HAZARDS UNDER A LINEAR PROJECT

S. CURTIL, P. GUÉRIN - GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

As part of the work of the line 2 of the tramway of Valenciennes for the contracting authority SITURV, one 1 km sector concerned by the underground caves related hazards (abandoned quarries of chalk: "catiches") has been identified. These cavities are inaccessible and shaped into a connected network. In these conditions, the treatment of the hazards is particularly difficult to reduce significantly the risk of sinkhole and to control the quantities of injection to be put in work (reduce the side losses beside the tramway platform). **GEOS Ingénieurs Conseils** designed a solution of treatment guaranteeing the perennity of the tramway platform while limiting the volumes of injections.