

# AUTOROUTE A150 – VIADUC DE L'AUSTREBERTHE : CONFORTEMENT D'UNE ANOMALIE KARSTIQUE PAR JET GROUTING

## HIGHWAY A150 - VIADUCT OF THE AUSTREBERTHE: CONFORTEMENT OF A KARSTIC ANOMALY BY JET GROUTING

Arnaud JUIGNET et Stéphane CURTIL<sup>1</sup>,  
<sup>1</sup> GEOS Ingénieurs Conseils, Rueil-Malmaison, France

**RÉSUMÉ** – Lors de la construction du viaduc l'Austreberthe sur l'A150, une anomalie karstique a été mise en évidence par des sondages de contrôle sous les pieux de fondation. Après une phase de diagnostic et d'analyses géologiques et structurales une solution de confortement par jet grouting a été conçue et mise en œuvre.

**ABSTRACT** – During the construction of the viaduct Austreberthe on A150, a karstic anomaly was found underneath of one of the pier foundation during the defects survey by the Contractor. After further geotechnical testing and analysis, the proposed solution to remediate the soil is to use jet grouting.

### 1. Présentation générale du projet

Dans le cadre de la construction de l'autoroute A150, en Normandie, une anomalie de type karstique a été mise en évidence lors de sondages de contrôle au droit de l'une des piles du viaduc de l'Austreberthe, sous les pieux de fondation. Cette situation ne permettant pas de garantir la pérennité des fondations de l'ouvrage, l'aléa découvert se devait d'être traité : une solution de confortement au moyen de colonnes de jet grouting a donc été mise en œuvre.

Le projet autoroutier, constitué d'un linéaire de 18 km entre Barentin et Yvetot, relie les deux tronçons existants de l'A150 et assure la jonction entre les autoroutes A28 et A29 (bouclage de la liaison entre Rouen et le Havre par le nord de la Seine). Quatorze ouvrages d'art sont construits dont le plus considérable est le viaduc de l'Austreberthe.

Ce viaduc, long de 480 m pour une hauteur au-dessus du sol atteignant 40 m, traverse la vallée de l'Austreberthe, un affluent de la Seine, sur la commune de Villers-Ecalles. Il s'agit d'un ouvrage en structure mixte (charpente métallique et béton armé) sur sept appuis : deux culées (C0 et C6) et cinq piles (P1 à P5). Il est lancé depuis la culée C6 en trois phases durant l'année 2014.



Figure 1. viaduc de l'Austreberthe (© GIE A150)

La pile P5, implantée sur le versant sud-est de la vallée, est fondée superficiellement. Les autres appuis sont fondés sur des pieux, ancrés dans la craie (quatre pieux Ø 1400 pour les culées et six pieux Ø 1800 pour les piles).

## 2. Contexte géotechnique et anomalie karstique

Le projet s'inscrit dans le contexte du plateau de Caux, qui forme un vaste entablement crayeux, recouvert en surface par des limons. Le substratum est constitué par la craie à silex du Crétacé supérieur (épaisseur maximale voisine de 250 m) présentant une altération plus ou moins marquée (craie altérée à fracturée), généralement en tête de la formation. La craie est surmontée par des formations résiduelles à silex (argiles à silex) qui affleurent en bord de plateau, tandis que le substratum apparaît sur les versants.

Le plateau crayeux est profondément entaillé par la vallée de l'Austreberthe, qu'enjambe le viaduc. Des alluvions, déposées par la rivière, en tapissent le fond.

Dans ce contexte géologique, des poches de dissolution et cavités karstiques peuvent être rencontrées au sein de la craie. Elles sont généralement remplies, partiellement ou totalement, par des formations résiduelles à silex, accompagnées parfois de sables et de limons argileux. L'altération karstique peut également prendre la forme d'une dissolution partielle de la craie accompagnée d'une réduction de ses caractéristiques mécaniques. Ces phénomènes constituent un aléa important pour la construction.

De plus, le risque d'interférence du projet avec des puits et des chambres souterraines anciennement utilisées pour l'extraction de la craie est également présent. Ces anciennes marnières, dont l'orifice est généralement comblé, provoquent parfois des effondrements localisés.

La découverte d'anomalies karstiques préalablement à la réalisation de la culée C0 a conduit le GIE A150 (Groupement Intérêt Economique) à réaliser une campagne approfondie de sondages de contrôle sur les autres appuis de l'ouvrage, dont les fondations étaient déjà réalisées.

Ces sondages complémentaires (forages de type destructif) ont mis en évidence la présence d'une anomalie dans la craie au niveau de la pile P1. L'examen des enregistrements des paramètres de forage et de leurs variations (augmentation de la vitesse d'avance et de la pression de retenue de l'outil, diminution de la pression d'injection et du couple de rotation) ont en effet permis d'identifier une zone fortement décomprimée, ne correspondant cependant pas à un vide franc. Ces observations ont été confirmées par des essais pressiométriques et par un sondage carotté qui a montré la présence, au sein de la craie, d'un matériau de remplissage silteux à limoneux contenant des débris de silex.



Figure 2a. Carotte des argiles de remplissage de l'anomalie karstique



Figure 2b. Carotte de craie saine sous le karst

L'anomalie a été localisée environ 2 m sous la base des fondations de la pile (pieux de 14,5 m de longueur) sur une épaisseur comprise entre 0,5 m et 2 m.

Compte tenu de la faible distance entre le toit de l'anomalie et la base des pieux, une solution de confortement se devait donc d'être mise en œuvre afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage.

### 3. Solution technique envisagées et présentation du chantier

Les efforts étant particulièrement importants en pointe des pieux, le principe de confortement qui a été retenu était de reporter l'application de ces efforts en profondeur, dans la craie saine. Pour cela, différentes solutions techniques ont été envisagées : micropieux, injections classiques, injections solides ou jet grouting.

C'est finalement la dernière solution, le jet grouting, qui a été choisie car elle apparaissait comme la plus adaptée au contexte tant géologique que technique. Il s'agit d'un procédé d'injection à haute pression d'un coulis de ciment qui permet de réaliser des colonnes de sol-ciment par la déstructuration du terrain. Le diamètre et la résistance à la compression des colonnes pouvant être obtenus par cette méthode sont compatibles avec les contraintes à faire transiter à travers l'anomalie sans poinçonner la craie.

En l'occurrence, les études ont démontré que la réalisation de quatre colonnes de 1,2 m de diamètre sous chaque pieu, avec une résistance à la compression de 5 MPa, permettait de justifier la stabilité de la pile, malgré la présence de l'anomalie.

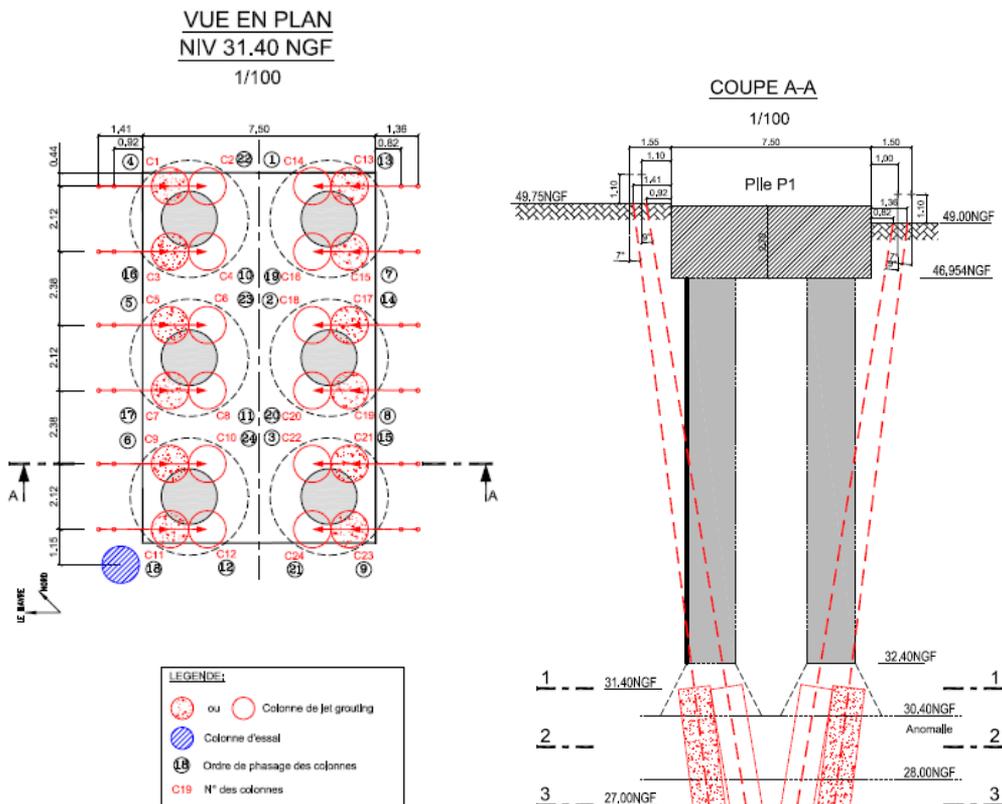


Figure 3. Principe de confortement par jet grouting

La réalisation des travaux de confortement a été confiée à SEFI INTRAFOR. Le programme initial du chantier était donc de réaliser 24 colonnes de jet grouting de 4 m de hauteur (recouvrement de 1 m minimum de part et d'autre de l'anomalie afin d'assurer son traitement complet).

L'installation de chantier de l'entreprise a pris place à côté de la pile : atelier de forage (foreuse Beretta T41), centrale à coulis, pompes, bacs,...

La technique employée est celle du jet double à l'air. Un filet d'air concentrique au jet de coulis améliore l'action de celui-ci. Une partie du sol traité remonte en surface sous forme d'un mélange de sol déstructuré et de coulis de ciment (appelé « spoils ») et la partie résiduelle se mélange au coulis pour former la colonne. Le coulis de ciment utilisé a été dosé avec un rapport C/E égal à 1 pour 750 kg/m<sup>3</sup> de ciment.

Les travaux doivent commencer par une phase de forages, inclinés entre 5 et 8° (colonnes positionnées sous les pieux), de part et d'autre de la pile. Dans un premier temps, les forages seront descendus jusqu'à 17 m de profondeur (base des pieux) en diamètre Ø 200 et équipés de tubes PVC Ø 160, scellés par un coulis de gaine, pour faciliter la remontée des spoils.



Figure 4a. Tête de forage avec tricône et buse de pour jet grouting



Figure 4b. Forages inclinés équipés avec un tubage pour faciliter la remonté des spoils

Dans un second temps, les forages seront poursuivis en diamètre plus petit (Ø 114) jusqu'à 27 m de profondeur. Ils serviront de sondages de reconnaissance pour confirmer la position de l'anomalie par l'analyse des paramètres de forage.

Enfin, le jet grouting sera réalisé. Le moniteur de jet (pièce tubulaire placée à l'extrémité des tiges de forage et comportant les buses d'injection) est descendu dans le forage, à la base de la zone à traiter. Le traitement par jet rotatif de coulis sous haute pression se fait ensuite en remontant pas à pas avec un temps de station à chacun d'entre eux. Le processus de traitement est exécuté automatiquement avec un réglage contrôlé des différents paramètres : débits et pressions des fluides, pas de remontée, temps de station et vitesse de rotation de la tête de jet grouting.

#### 4. Plot d'essai

Avant d'entamer les travaux, un plot d'essai a été réalisé afin de vérifier la validité des paramètres de Jet Grouting choisis vis-à-vis des objectifs à atteindre :

- Pression de coulis : 450 bars
- Débit de coulis : 280 L/min
- Pression d'air : 9 bars

- Temps de station : 10 s
- Pas de remontée : 3 cm
- Vitesse de rotation : 55 tr/min

L'analyse des paramètres du forage de reconnaissance a permis de confirmer la position de l'anomalie vers 21 m de profondeur.

Les contrôles qui ont été effectués afin de vérifier le respect des objectifs fixés sont les suivants : contrôles sur le coulis et sur les spoils et contrôle du diamètre de la colonne. Les contrôles sur le coulis et les spoils consistent en des essais de compression à 7, 14 et 28 jours sur des échantillons prélevés en sortie de centrale pour le coulis et lors du Jet Grouting pour les spoils. Des mesures de densité sont également effectuées sur le coulis et les spoils.



Figure 5a. Réalisation du plot d'essais de jet grouting



Figure 5b. Prélèvements d'éprouvettes de spoils pour mesures de Rc

Le diamètre de la colonne a été contrôlé par la méthode du cylindre électrique. Cette méthode permet de déterminer le diamètre d'une colonne de jet grouting avec une précision de 10 % en utilisant la différence de résistivité entre une colonne et le sol.

Un profil de résistivité du sol vierge est réalisé avant l'exécution de la colonne : la sonde de mesure est introduite dans le forage de reconnaissance tubé et rempli d'eau. Après réalisation de la colonne, le forage de reconnaissance est exécuté à nouveau, cette fois, à travers la colonne, et un nouveau profil de résistivité est mesuré. Cette mesure est effectuée lorsque la colonne est fraîche car sa résistivité étant alors faible, le contraste avec la résistivité plus élevée du sol va permettre de déterminer le diamètre de la colonne.

Les résultats du plot d'essai se sont avérés satisfaisants. L'objectif de résistance à la compression de 5 MPa a été atteint sur les spoils dès 7 jours (résistance obtenue à 28 jours supérieure à 20 MPa). La densité des spoils a augmenté de façon significative au niveau de l'anomalie : valeurs mesurées supérieures à 1,6 (densité du coulis : 1,5), ce qui montre que le mélange sol-ciment s'est effectivement fait. Ce mélange était d'ailleurs aisément visualisable (spoils plus épais). Enfin, la mesure de cylindre électrique a montré que le diamètre de la colonne atteint 1,2 m au niveau de l'anomalie.

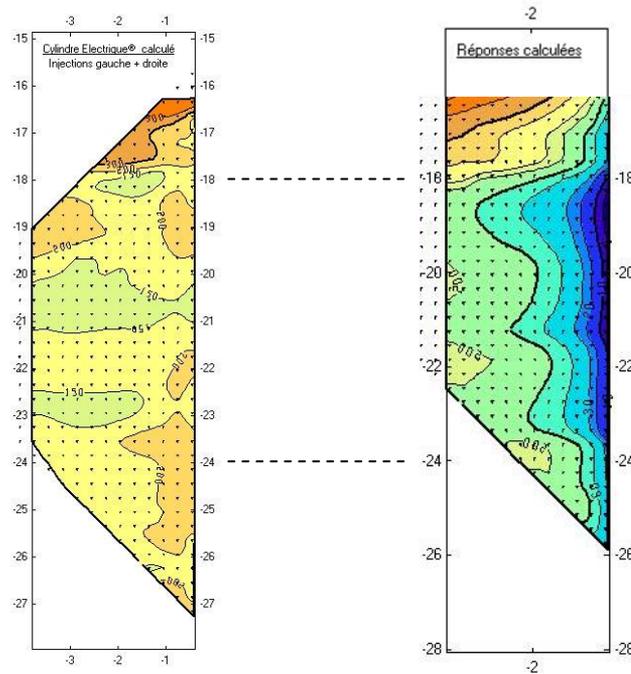


Figure 6a. Mesure de cylindre électrique en forage avant jet grouting

Figure 6b. Mesure de cylindre électrique en forage après jet grouting

## 5. Déroulement du chantier et bilan des travaux

La technique du jet grouting connaît de nombreuses applications pour le renforcement des sols, mais il n'existait que très peu de retour d'expérience sur l'efficacité de la technique dans un contexte karstique. Ainsi, il a été décidé de mettre en place un suivi géotechnique de l'exécution renforcé associé et des procédures de contrôle stricts lors de l'exécution de manière à garantir la parfaite stabilité de la fondation de l'ouvrage.

Le succès du plot d'essai a validé les différents paramètres utilisés et les travaux de confortement ont alors été lancés. Le chantier s'est déroulé suivant le phasage présenté plus haut avec tout d'abord la phase de forages (équipement et reconnaissance). Les paramètres de forage ont été analysés pour déterminer les cotes définitives de réalisation des colonnes de jet grouting. La hauteur des colonnes a été portée à 4,5 m avec un positionnement en altitude homogène afin d'assurer un traitement complet de l'anomalie et un fonctionnement mécanique efficace.



Figure 7a. Colonne de jet grouting avec pompage des spoils



Figure 7b. Contrôle de densité des spoils à la balance baroïde

La réalisation des 24 colonnes a ensuite nécessité huit jours de travail, avec un phasage pour permettre la prise du ciment de chaque colonne avant la réalisation des colonnes adjacentes.

Les contrôles des paramètres de l'exécution et des coulis et spoils (résistance à la compression et densité) ont été réalisés de manière systématique sur l'ensemble des colonnes. Un contrôle de diamètre par la méthode du cylindre électrique a été effectué sur les trois premières colonnes.

En complément, un contrôle topographique régulier de la pile a été mené par le GIE, afin de détecter d'éventuels tassements ou déformations induits par les travaux d'injection. Cette mesure a été doublée avec la mise en place de dispositifs de contrôle visuel immédiat (niveaux et pendules) pour permettre à l'entreprise un contrôle continu des éventuels déplacements.



Figure 8a. Instrumentation de suivi de verticalité de la pile P1



Figure 8b. Pile P1 achevée

## 6. Conclusion

La découverte d'une anomalie karstique, remplie d'argile, dans le massif crayeux, à moins de 2 m sous la pointe des pieux de la pile P1 du viaduc de l'Austreberthe a imposé la mise en œuvre d'une solution technique inédite en matière de traitement de karsts : des colonnes de jet grouting. Les études de la géométrie de l'anomalie et de la nature du remplissage (argile de décalcification à forte teneur en eau) ont en effet montré que les autres solutions de confortement qui ont pu être envisagées (injection de coulis de ciment ou injection solide) n'étaient pas en mesure d'apporter la sécurité nécessaire à la fondation de l'ouvrage.

Les résultats de l'ensemble des procédures et essais de contrôle ont tous été satisfaisants. Le jet grouting a ainsi apporté une réponse technique totalement adaptée au contexte géologique et aux contraintes techniques pour le confortement des fondations profonde de la pile du viaduc en interaction avec une anomalie karstique.