

RETOUR D'EXPERIENCE SUR LE CONFORTEMENT D'ANOMALIES KARSTIQUES PAR JET GROUTING : VIADUC DE L'AUSTREBERTHE (A150)

AUTEURS : STEPHANE CURTIL, DIRECTEUR, GEOS INGENIEURS CONSEILS – ARNAUD JUIGNET, INGENIEUR, GEOS INGENIEURS CONSEILS – ALAIN SALEH, CONDUCTEUR DE TRAVAUX PRINCIPAL, SEFI-INTRAFOR, PASCAL GOUZENNE, DIRECTEUR DE TRAVAUX, RAZEL-BEC

INTRODUCTION



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 : après analyse des différentes options de renforcement possibles, une solution de confortement au moyen de colonnes de Jet Grouting a donc été mise en œuvre.

PRESENTATION GENERALE DU PROJET

Le projet autoroutier, constitué d'un linéaire de 18 km entre Barentin et Yvetot, relie les deux tronçons existants de l'A150, ce qui assure la jonction entre les autoroutes A28 et A29 (bouclage de la liaison entre Rouen et le Havre par le nord de la Seine). Il implique la construction de quatorze ouvrages d'art 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.

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).

CONTEXTE GEOTECHNIQUE

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) sont fréquemment rencontrées au sein de la craie. Elles peuvent contenir un remplissage de formations résiduelles à silex, accompagnées parfois de sables et de limons argileux.

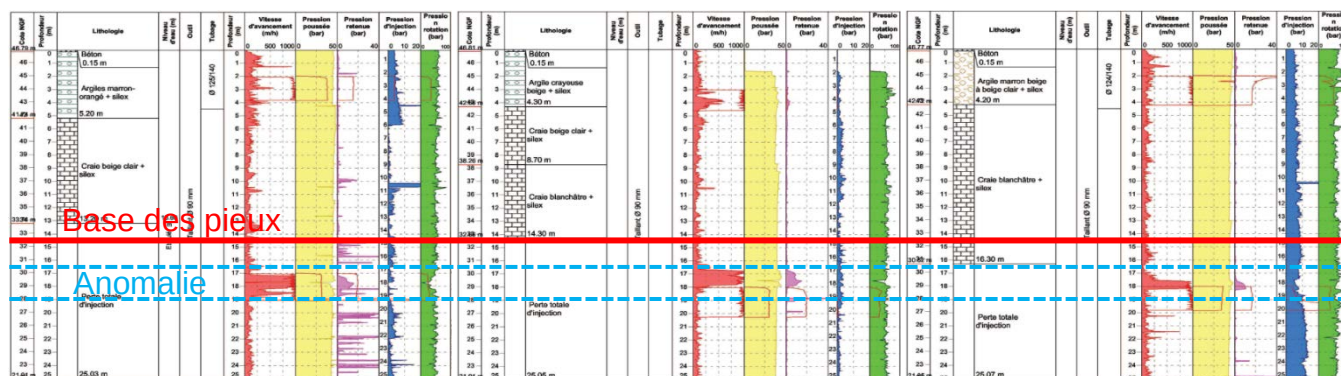
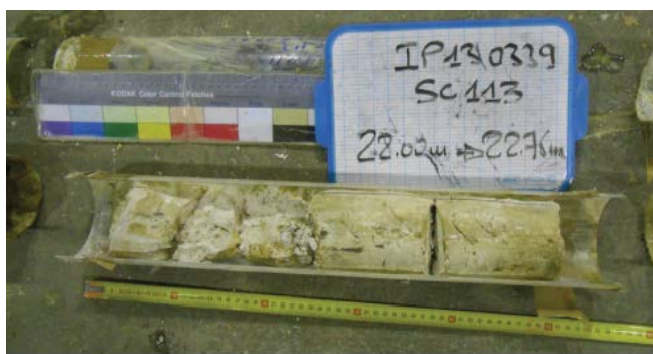
L'altération karstique peut également prendre la forme d'une dissolution partielle de la craie accompagnée d'une réduction de ses caractéristiques mécaniques. Ces phénomènes constituent un aléa important pour la construction.

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.

ANOMALIE KARSTIQUE

La découverte d'anomalies karstiques préalablement à la réalisation de la culée C0 a conduit le GIE A150 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 (figure n°3). Ces observations ont été confirmées par des essais pressiométriques et par un sondage carotté (figure n° 4) qui a montré la présence, au sein de la craie, d'un matériau de remplissage silteux à limoneux contenant des débris de silex.



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.

SOLUTIONS ENVISAGEES

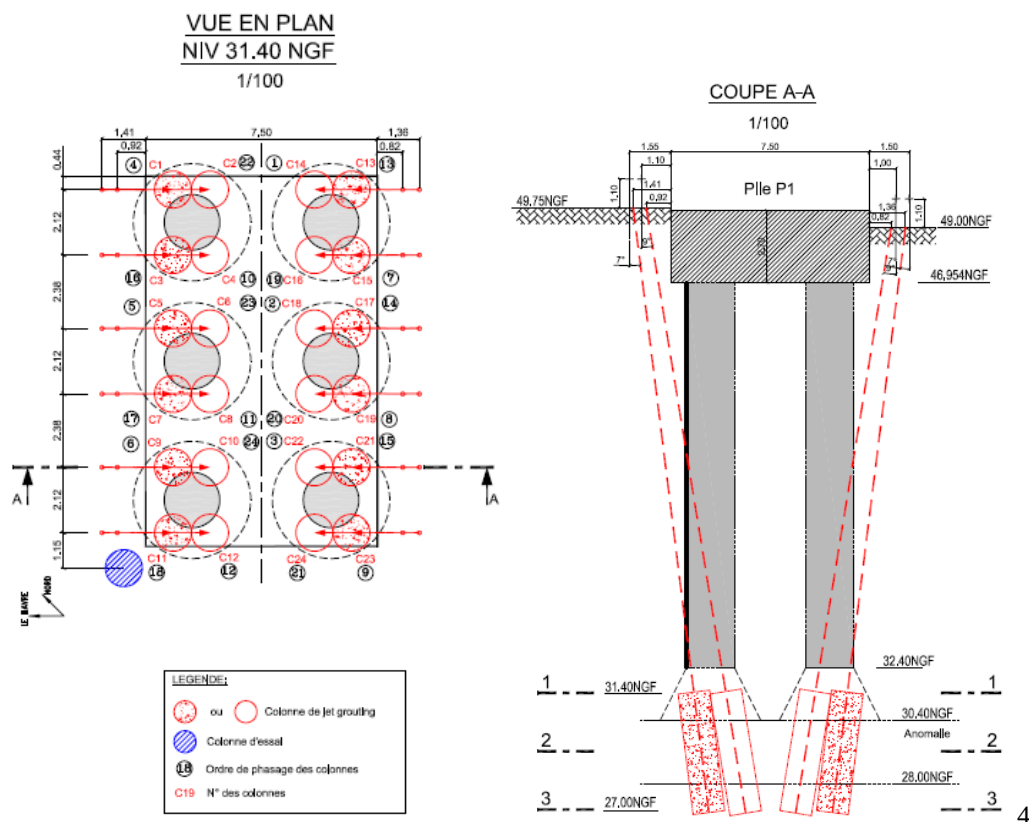
Les efforts étant particulièrement importants en pointe des pieux, le principe de confortement qui a été retenu était de reporter l'application de ces efforts en profondeur, dans la craie saine. Pour cela, différentes solutions techniques ont été envisagées :

- Ajout de micropieux de renforcement de la fondation,
- Réalisation d'une campagne d'injections classiques de coulis,
- Réalisation d'injections solides dans la zone de l'anomalie identifiée,
- Ajout de colonne de Jet Grouting traversant l'anomalie et assurant le transfert des charges en profondeur.

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 destructuration en place du terrain sous l'effet des pressions d'injection. Le diamètre et la résistance à

la compression des colonnes pouvant être obtenu 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. La figure n° 4 présente l'implantation des colonnes au voisinage des pieux, sous la semelle de liaison. Les inclinaisons des forages permettent de venir inscrire les colonnes de Jet Grouting dans le cône de diffusion des efforts en pointe de pieux



DESCRIPTION DU CHANTIER

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 permettant un recouvrement de 1 m minimum de part et d'autre de l'anomalie afin d'assurer son traitement complet, y compris si la géométrie de l'anomalie venaient à ne pas être exactement celle attendue.

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 pour l'exécution des colonnes de Jet Grouting est celle du jet double à l'air. Un filet d'air concentrique au jet de coulis améliore l'action de celui-ci. Lors de l'exécution, une partie du sol traité remonte en surface sous forme de spoils (mélange de sol déstructuré et de coulis) 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/m³ de ciment de manière à garantir la résistance finale des colonnes.

Afin que les colonnes soient positionnées sous les pointes des pieux, les travaux doivent commencer par une phase de forages, inclinés entre 5 et 8°, de part et d'autre de la pile (figure n° 5). Dans un premier temps, les forages sont 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 et donc le contrôle en continu de la qualité de l'exécution de l'ouvrage



5

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

Enfin, le Jet Grouting est réalisé depuis le bas de la colonne vers le haut. Le moniteur de Jet (pièce tubulaire placée à l'extrémité des tiges de forage et comportant les buses d'injection – figure n° 6) est descendu dans le forage, à la base de la zone à injecter. L'injection se fait en remontant pas à pas, avec un temps de station à chacun d'eux de manière à garantir le diamètre finale des colonnes.



6

Le processus d'exécution de la colonne est piloté automatiquement : le réglage des différents paramètres (débits de coulis et pressions des fluides, pas de remontée, temps de station, vitesse de rotation) se fait au moyen d'une unité de contrôle (figure n° 7) selon un protocole qui a préalablement été validé par la réalisation d'une colonne d'essai sur le même site.



7

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 pour le confortement des sols sont les suivants :

- Contrôles des caractéristiques physiques et de résistance sur le coulis et sur les spoils,
- Contrôle du diamètre de la colonne après exécution.

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 (figure n° 8) et lors du Jet Grouting pour les spoils. Des mesures de densité (figure n° 9) sont également effectuées sur le coulis et les spoils (figure n° 10).



10



8



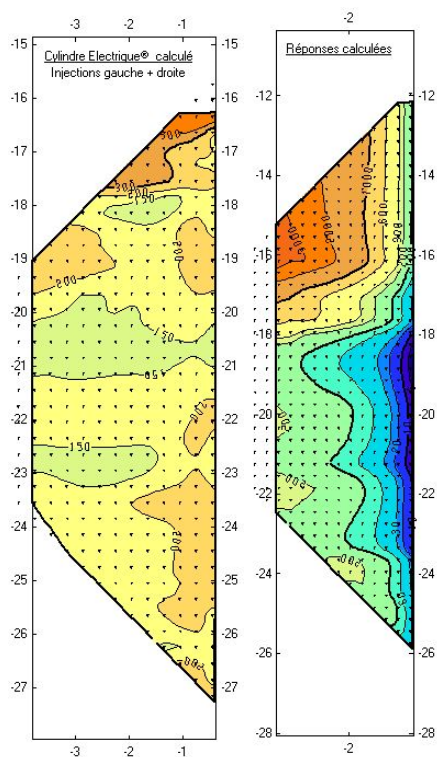
9

Après exécution, le diamètre de la colonne est contrôlé par la méthode du cylindre électrique. L'entreprise SOLDATA est en charge de cette prestation. Cette méthode permet de déterminer le diamètre d'une colonne de Jet Grouting avec une précision de l'ordre de 10 % en utilisant la différence de résistivité entre les matériaux constitutifs de la colonne et le sol (figure n° 11).



11

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 (figure n° 12).



12

Les résultats du plot d'essai ont permis de valider les paramètres d'exécution proposés. 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 – figure n° 13)). Enfin, la mesure de cylindre électrique a montré que le diamètre de la colonne atteint 1,2 m au niveau de l'anomalie.



13

DEROULEMENT DU CHANTIER

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 (figure n° 4) avec tout d'abord la phase de forages (équipement et reconnaissance - figure n°14). Les paramètres de forage ont été analysés par SEFI INTRAFOR et GEOS pour déterminer les cotes définitives de réalisation des colonnes de Jet Grouting. Selon les données d'enregistrement de forages, il a été décidé de modifier la hauteur des colonnes qui 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 du confortement du massif.



14

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.

Compte tenu des conditions particulières de cette intervention de confortement des sols sous une fondation déjà construite, les contrôles (résistance à la compression et densité) sur le coulis et les spoils ont été renforcés et 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 afin de s'assurer que le diamètre visé et validé par la colonne d'essai était bien reproduit.

En complément, un contrôle topographique régulier de la pile (figure n° 15) a été mené par le groupement de constructeur, afin de détecter d'éventuels tassements ou déformations induits par les travaux de jet Grouting. 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.



15

BILAN DES TRAVAUX

Les résultats de l'ensemble des essais de contrôle ont tous été satisfaisants vis-à-vis des seuils requis. Les travaux engagés ont donc bien permis de conforter les fondations de la pile P1 du viaduc (figure n° 16) vis-à-vis de la problématique posée par la présence d'une anomalie karstique sous la base des pieux. La technique du Jet Grouting s'est montrée très bien adaptée au contexte géologique et aux contraintes techniques.



16

Principaux intervenants

Maître d'ouvrage : ALBEA

Groupement concepteur-constructeur : GIE A150 (RAZEL-BEC / NGE)

Ingénierie intégrée : INGEROP-RAZEL-NGE / Géotechnique : GEOS Ingénieurs Conseils

Réalisation du Jet Grouting : SEFI INTRAFOR

Contrôle du diamètre des colonnes : SOLDATA

Principales quantités

Forages de diagnostic avant traitement : 600 m

Nombre de pieux renforcés : 6

Nombre de colonnes de Jet Grouting : 24

Photos (légendes et crédits) :

1 : viaduc de l'Austreberthe (© GIE A150)

2 : remplissage de l'anomalie et craie sous-jacente (© Fondasol)

3 : log des enregistrements des paramètres de forage de Jet Grouting (© SEFI INTRAFOR)

4 : plan d'exécution du Jet Grouting (© SEFI INTRAFOR)

6 : tête de forage et de Jet grouting (© GEOS)

7 : enregistreur de paramètres de forage / unité de contrôle du Jet Grouting (© GEOS)

8 : préparation d'éprouvette pour essais d'écrasement (© GEOS)

9 : mesure de la densité des spoils (© GEOS)

10 : prélèvement de spoils pour essais (© GEOS)

11 : mesure de résistivité (© GEOS)

12 : profils de résistivité mesurés avant et après réalisation de la colonne de Jet Grouting (© GEOS)

13 : remontées des spoils épaissis (© GEOS)

14 : Jet Grouting (© GEOS)

15 : niveau pour contrôle visuel immédiat (© GEOS)

16 : pile P1 (© GEOS)

Résumé (700 caractères) :

La découverte d'une anomalie karstique sous la point de pieux de fondation de la pile P1 du viaduc de l'Austreberthe sur l'A150 a nécessité l'engagement d'une campagne de diagnostic géométrique et géomécanique permettant d'apprécier son éventuel impact sur la sécurité de l'ouvrage. L'extension latérale et la proximité de cette anomalie avec la fondation de la pile ont imposé la mise en œuvre de mesures compensatoires qui, après examen des différentes options possibles (micropieux, injections, injections

solides, jet grouting, etc.), ont pris la forme d'un traitement par Jet Grouting capable de garantir le transfert des charges vers le substratum sain. Les travaux ont été conçus et exécutés en intégrant les contraintes géométriques d'accessibilité imposées par les pieux et de la semelle de liaison de la pile.