



© CÉDRIC HELSLY POUR SOLETANCHE BACHY

JET-GROUTING POUR MONUMENT EN PÉRIL À SAINT-GERMAIN DE CHARONNE

AUTEURS : ROBERT PORET, DIRECTEUR TRAVAUX SOLETANCHE BACHY FRANCE - JEAN-FRANÇOIS LAGNEAU, ARCHITECTE EN CHEF DES MONUMENTS HISTORIQUES

POUR PÉRENNISER CETTE ÉGLISE MULTISÉCULAIRE, ÉRIGÉE SUR DES FONDATIONS INSUFFISANTES ET QUI A CONNU DES AMÉNAGEMENTS SUCCESSIFS AU FIL DU TEMPS, LA VILLE DE PARIS A PROGRAMMÉ UNE CAMPAGNE DE SAUVEGARDE DONT LES TRAVAUX DE REPRISE EN SOUS-ŒUVRE, PAR JET GROUTING, PERMETTRONT DE CONSOLIDER L'ASSISE DU BÂTIMENT.

L'église de Saint-Germain de Charonne est un édifice multi-séculaire (voir encadré « Un peu d'Histoire ») implanté dans le 20^e arrondissement de la capitale, sur le flanc sud d'un coteau très escarpé. Elle est fondée sur des remblais et colluvions composés d'argiles sableuses et de marnes vertes, le bon sol n'ap-

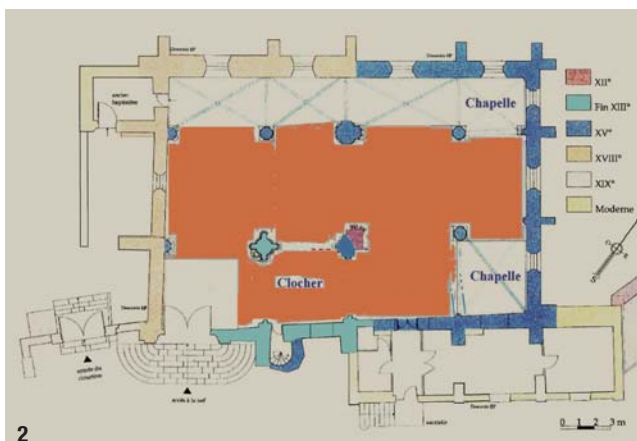
paraissant qu'à partir d'une dizaine de mètres de profondeur. De plus, les niveaux des fondations sont très disparates, en raison notamment d'un mode de construction du bâtiment largement étalé dans le temps : ces fondations, déstructurées, sont de fait composées d'un moellonnage grossier hourdé à la chaux.

1- L'église Saint-Germain de Charonne et les installations de chantier.

1- Saint-Germain de Charonne church and the construction plant.

UNE PATHOLOGIE SÉCULAIRE

L'étude historique a révélé que, s'il est vrai que l'édifice bougeait depuis longtemps (figure 5), il connaissait néanmoins depuis quelques décennies une période de stabilité. Mais, au début de l'an 2000, des fissures étaient réappares, situées tout d'abord au niveau des arcs-boutants construits au XIX^e siècle



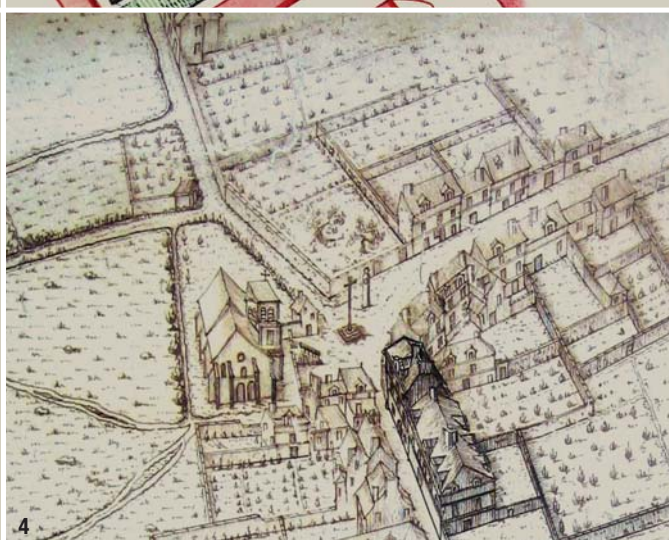
2



3

UN PEU D'HISTOIRE

L'église de Charonne est l'église paroissiale de l'ancien village de Charonne, annexé à Paris en 1859, et l'une des rares qui n'aient pas été reconstruites. Elle se dresse sur le flanc sud d'un coteau très escarpé ; entourée de son cimetière, elle constitue l'un des derniers enclos funéraires de la capitale, avec celui de Saint-Pierre de Montmartre. Elle aurait été construite sur l'emplacement d'un oratoire élevé en mémoire de la rencontre de sainte Geneviève et de saint Germain, évêque d'Auxerre, au cours du V^e siècle. Si l'on trouve au droit du clocher les vestiges d'une construction du XIII^e siècle, l'église actuelle date essentiellement du XV^e siècle, avec des interventions ultérieures à la période classique. Incendiée à la fin du XVII^e siècle, elle sera grossièrement réparée et restera amputée de sa façade ouest, et probablement de sa travée adjacente (figures 2 à 4). Du fait d'importants travaux de voirie réalisés au début du XIX^e siècle, elle domine maintenant largement son environnement grâce à de hauts murs de soutènement en meulière. L'église est classée Monument Historique depuis le 23 mai 1923 et elle est affectée au culte catholique.



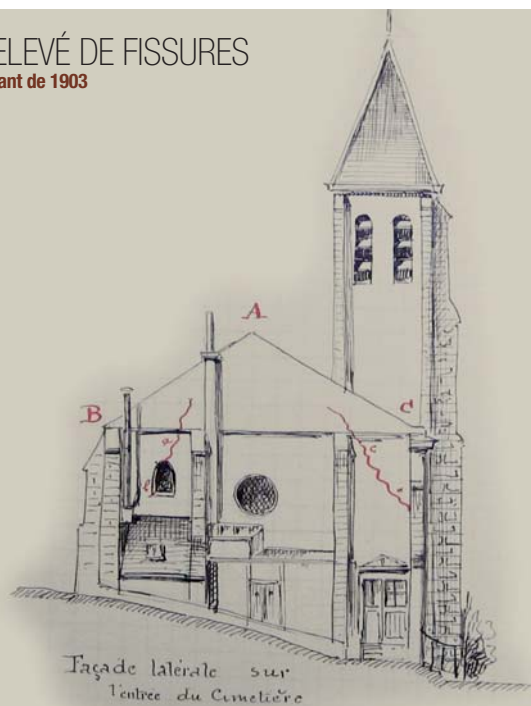
4

© VILLE DE PARIS

- 2- Différentes époques de construction.
- 3- Plan du quartier datant de la deuxième moitié du XVIII^e siècle.
- 4- Dessin du quartier vers 1750.
- 5- Relevé de fissures datant de 1903.

- 2- Various construction periods.
- 3- Map of the district dating from the second half of the 18th century.
- 4- Drawing of the district around 1750.
- 5- Crack report dating from 1903.

RELEVÉ DE FISSURES datant de 1903



© VILLE DE PARIS

5

contre le flanc sud. Après la restauration des toitures, de l'orgue et de sa tribune en 2005, la municipalité procéda à l'examen des réseaux enterrés avant de commander, en 2007, une étude approfondie. Les sondages géologiques et archéologiques confirmèrent alors la médiocre qualité du terrain et la faible assise des fondations. Les fissures se sont ensuite considérablement développées au cours de l'année 2009, avec l'apparition de véritables coulèures parcourant les parements et les voûtes de l'édifice. À noter que ces désordres ne se limitaient pas à l'édifice et à ses abords, mais qu'ils s'étendaient également aux murs de soutènement du parvis et du cimetière. Eux aussi présentaient de larges fractures horizontales ou verticales. Ces ouvrages, dont la résistance se révèle aujourd'hui insuffisante, ont été érigés dans les années 1930, suite aux travaux d'abaissement du niveau de la rue de Bagnolet. Ces travaux entraînèrent en effet la démolition des bâtiments qui formaient, au-devant de l'église, l'alignement de la rue. ▷



6 © GÉRICH HELSLEY POUR SOLETANCHE BACHY

6- Vue des bracons métalliques.

7- Vue en plan de l'église avec l'implantation des colonnes.

8- Coupe type des colonnes de jet grouting sous un mur.

9- Coupe type des colonnes de jet grouting sous un poteau.

6- View of the metallic struts.

7- Plan view of the church with the layout of the columns.

8- Typical cross section of jet grouting columns under a wall.

9- Typical cross section of jet grouting columns under a pillar.

Les démolitions constituent très probablement l'une des causes supplémentaires de la déstabilisation du site en aval de l'église. Après cette nouvelle alerte, l'église fut alors fermée au public le 2 décembre 2009 en application des recommandations du rapport technique établi par le Département des Édifices Culturels et Historiques de la Ville de Paris. Une nouvelle phase de travaux,

destinés à sécuriser le bâtiment, fut alors entreprise.

Elle consista à garantir le maintien de la façade sud-est, la plus sensible, grâce à la mise en œuvre d'un dispositif de bracons métalliques et de massifs sur micropieux (figure 6).

Les déformations étaient, par ailleurs, contenues au moyen d'un corsetage intérieur constitué de cintres en bois.

UNE INTERVENTION URGENTE

Outre cette opération de sécurisation immédiate à caractère provisoire, il s'agissait essentiellement de sauver l'édifice d'un effondrement certain, en agissant directement sur ses fondations, afin de reporter correctement les charges sur le bon sol. Pour ce faire, une campagne de reprise en sous-œuvre a été menée : elle nécessitait six

mois d'intervention, avec notamment la réalisation de 190 colonnes de jet grouting en jet simple (voir encadré : Le jet grouting pour les nuls) de 3 à 10 m de profondeur (diamètre 0,80 et 1 m) (figures 7 à 9). À noter que la possibilité de régénérer la base des anciennes maçonneries, en venant les imprégner de « spoil », représentait un atout en faveur de cette technique.

VUE EN PLAN DE L'ÉGLISE
avec l'implantation des colonnes



7

© SOLETANCHE BACHY

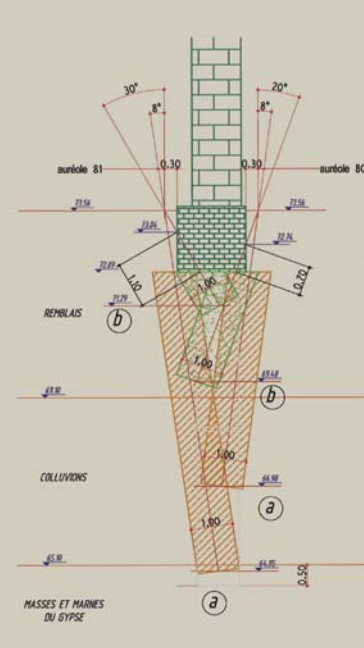
COUPE TYPE
des colonnes de jet grouting sous un mur



8

© SOLETANCHE BACHY

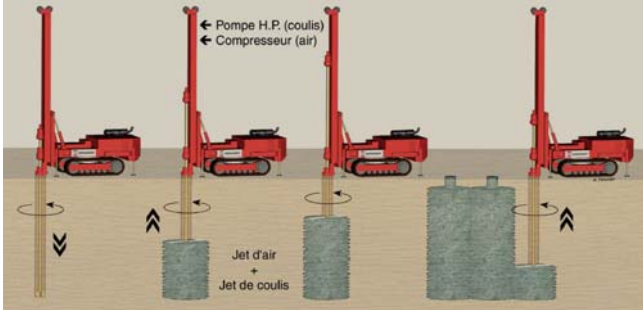
COUPE TYPE
des colonnes de jet grouting sous un poteau



9

© SOLETANCHE BACHY

PRINCIPE DU JET GROUTING



10

© SOLETANCHE BACHY

DIFFÉRENTS TYPES DE JET GROUTING



Jet simple

Jet double

Jet triple

11

© SOLETANCHE BACHY

LE JET GROUTING POUR LES NULS

Le procédé de jet grouting consiste à déstructurer le terrain en profondeur à l'aide d'un jet fluide haute pression (classiquement de 20 à 40 MPa) dans un forage, puis à mélanger le sol érodé avec un coulis liquide autodurcissant afin de former des colonnes, panneaux et autres structures dans le terrain (figure 10). Le matériau résultant de ce mélange se caractérise par une substitution plus ou moins importante du sol en place, dépendant de la géologie (nature, granulométrie, composition, compacité) et de la technique utilisée (jet simple, double ou triple), mais aussi de l'objectif à atteindre (diamètre, composition, résistance des colonnes).

Dans les terrains granulaires, le jet à haute énergie cinétique disperse les grains par érosion, alors que dans un sol cohérent, il découpe des morceaux plus ou moins gros d'argile. Dans la pratique, un forage de 100 à 200 mm est exécuté sur la hauteur à traiter, le jet de fluide étant ensuite envoyé par une pompe haute pression à travers une ou plusieurs buses de faible section (diamètre de 1 à 10 mm) placées sur un moniteur au pied d'un train de tiges de 70 à 100 mm de diamètre. La tige, mise en rotation, est ensuite remontée lentement afin de former la colonne.

Durant la phase de jet, les volumes en excès du mélange sol-ciment (appelés rejets ou spoil) doivent ressortir librement en tête de forage - l'excès de matériau risquant de « claquer » le terrain et de créer des désordres au voisinage - puis être évacués du chantier au fur et à mesure de l'avancement. Dans le procédé à double jet, le jet de coulis est entouré par un jet d'air annulaire qui crée un cône enveloppant et augmentant le rayon d'action : l'ensemble améliore les possibilités d'extraction. En jet triple, les fonctions déstructuration et extraction du terrain sont obtenues par un jet double d'eau et d'air, l'incorporation du liant étant assurée par un jet de coulis envoyé simultanément à basse pression (quelques MPa) par une buse inférieure (figure 11).

Le procédé de jet grouting s'applique à tous les terrains meubles ou au rocher tendre, principalement en consolidation et, sous certaines conditions, en étanchéité : reprise en sous-œuvre de bâtiments, coupure étanche de barrage, soutènement de fouilles, voûte parapluie pour tunnel avec consolidation éventuelles en piédroits, voile de consolidation pour quais...

10- Principe du jet grouting.

11- Différents types de jet grouting.

12- Foreuse compacte.

13- Centrale de fabrication du coulis et d'injection haute pression.

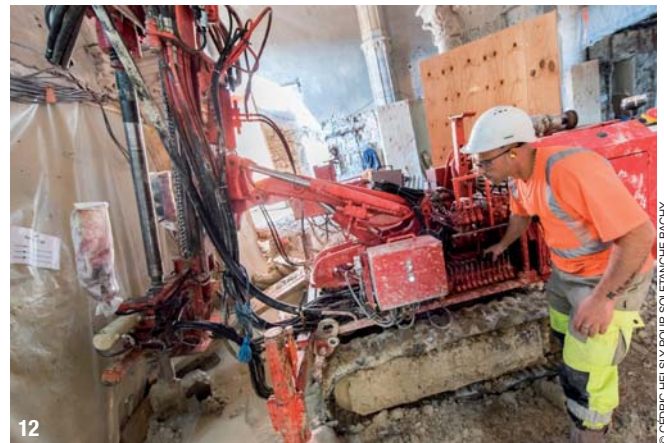
10- Jet grouting schematic.

11- Various types of jet grouting.

12- Compact drill.

13- Grout production and high-pressure injection plant.

Précisons que, par crainte de la destruction des vestiges archéologiques enfouis, essentiellement par des remplissages dus au coulis de jet grouting, les travaux de consolidation furent précédés d'une importante campagne de fouilles archéologiques extensives. Ces investigations ont permis de mettre à jour les anciennes dispositions de l'édifice, de mieux les comprendre et de récupérer tout le mobilier funéraire et les autres objets qui avaient été mis en terre. Dans la pratique, les travaux ont été exécutés au moyen d'une machine compacte Beretta T46 (figure 12), compatible avec les contraintes majeures du chantier, à savoir les difficultés d'accès et l'exiguïté du site. À titre d'exemple, les bracons métalliques extérieurs et l'étroitesse de la porte d'entrée interdisaient de faire pénétrer l'engin dans la zone correspondant à l'ancienne sacristie. De ce fait, l'engin a été gruté à travers la toiture, préalablement déposée avant restauration. La centrale de fabrication et d'injection (170 bars) du coulis était également de conception compacte, avec deux silos horizontaux de 25 t empilés en partie supérieure (figure 13). Autre difficulté : la gestion du spoil. ▽



12

© CÉDRIC HELSLEY POUR SOLETANCHE BACHY

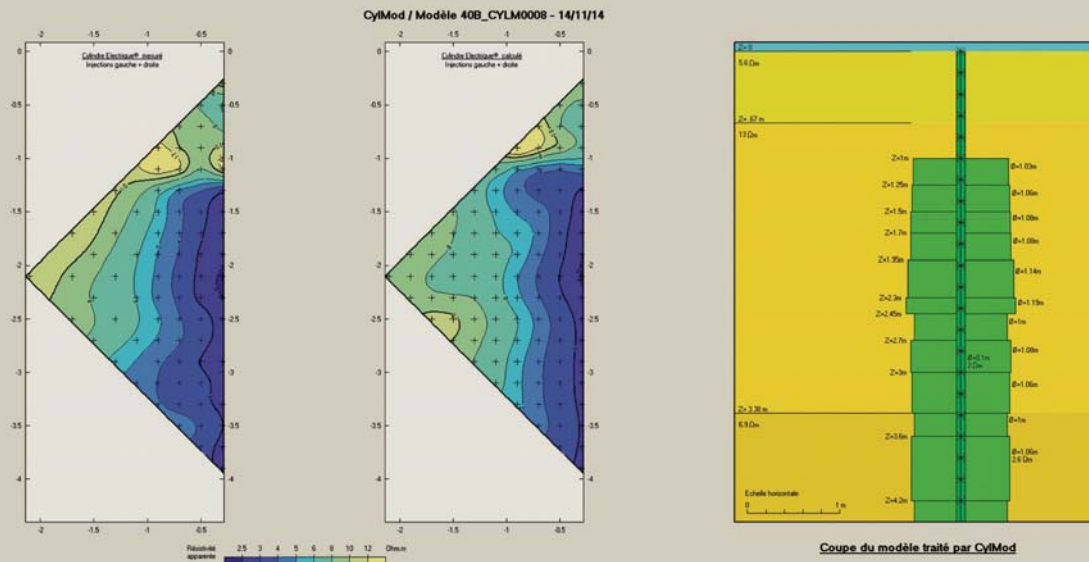


13

© CÉDRIC HELSLEY POUR SOLETANCHE BACHY

PLANCHE CYLJET SUR UNE COLONNE :

à gauche la colonne mesurée, au centre la colonne modélisée, à droite l'analyse avec les diamètres retenus



14

© SOLDATA

LE CYLJET® CONTRÔLE LES COLONNES

Les techniques mécaniques traditionnelles, conçues pour vérifier les paramètres d'exécution d'une colonne de jet grouting ont, outre des difficultés purement pratiques dues à l'utilisation de bras palpeurs mécaniques, très vite montré leurs limites en termes de précision des mesures.

La méthode d'évaluation brevetée Cyljet®, mise au point par Soldata Geophisic, est une technique de super diagraphie capable de pallier ces problèmes, via la possibilité d'évaluer, *in situ*, le diamètre des colonnes de jet avec une précision de 10%.

Cette solution d'investigation repose sur l'utilisation du procédé « Cylindre Électrique » qui permet d'obtenir une auscultation électrique d'un cylindre de 8 à 10 m autour d'un forage, suivant la résistivité des terrains.

Elle consiste à disposer, à l'intérieur d'un forage, un câble multiconducteur comprenant des électrodes d'émission intercalées avec des électrodes de réception, réparties régulièrement.

Une différence de potentiel est ensuite générée entre un point de référence éloigné et chacune des électrodes de réception qui sont successivement interrogées ; les différences de résistivité mesurées permettent alors différentes applications, telles la recherche d'anomalies ponctuelles, la reconnaissance à l'avancement d'un tunnel, la localisation de pollutions, le contrôle de l'injection, etc.

Cette technique, appliquée aux colonnes de jet grouting, permet de déterminer la limite entre le terrain en place et le matériau de jet.

L'interprétation des mesures s'effectue par l'intermédiaire d'un logiciel spécifique et utilise la méthode d'inversion.

Dans la pratique, un tube PVC crépiné abritant les électrodes est descendu dans la colonne fraîche, jusqu'à 2 à 3 m sous sa base, lorsque la longueur de celle-ci n'excède pas une dizaine de mètres depuis la surface.

Pour des profondeurs supérieures, il faut attendre une courte période de séchage avant de procéder à un carottage de la colonne en vue d'introduire le tube.

Par comparaison avec les mesures préliminaires, qui ont servi à définir les résistivités du sol en place, il est alors possible de définir la géométrie de la colonne : le béton de sol réalisé a en effet une résistivité très basse par rapport aux sols habituels.

La méthode a déjà permis de mesurer 1 400 colonnes sur plus d'une centaine de chantiers.

14- Planche Cyljet sur une colonne : à gauche la colonne mesurée, au centre la colonne modélisée, à droite l'analyse avec les diamètres retenus.

15- Évacuation du spoil stocké dans des bacs.

14- Cyljet logging on a column: on the left the measured column, in the center the modeled column, on the right the analysis with the diameters adopted.

15- Removal of the spoil stored in containers.

UN PHASAGE ÉVOLUTIF

La nature fortement argileuse du terrain expliquait, qu'en effet, le taux de substitution du terrain était proche de 100% avec, en conséquence, d'importants volumes à évacuer quotidiennement - une colonne de 10 m générant environ 12 m³ de « spoil » - le matériau résiduel se caractérisant par une prise assez rapide. La pelle mécanique qui assurait le chargement des camions avait - toujours pour illustrer l'exiguïté du site - terrassé sa propre rampe d'accès afin d'atteindre la plateforme de travail, le stockage du spoil étant réalisé dans une cuve constituée de murs préfabriqués en L (figure 15).

Quant aux travaux eux-mêmes, ils se sont déroulés de l'intérieur vers l'extérieur, la proximité de certaines sépul-



15

© GÉRIE HELSÛY POUR SOLETANCHE BACHY



16



17

tures interdisant notamment toute possibilité d'intervenir, côté extérieur, sur la façade est. À noter que le cimetière paroissial abrite des tombes de célébrités, entre autres celle de l'épouse d'André Malraux et celle de Robert Brasillach.

Durant la première phase, à l'intérieur donc, les forages se sont déroulés en ajustant le planning en fonction des réactions du bâtiment : celui-ci, toujours très sensible et fragile, était ausculté en permanence par des capteurs de mouvements reliés à une centrale de recueil des données.

Les travaux ont été menés en pianotant sur trois zones distinctes (figure 16) ; il s'avérait parfois nécessaire de revenir sur un même point, chacun d'eux comportant en effet 2 à 4 colonnes. Des carottages préalables ont, par

ailleurs, dû être exécutés pour certaines colonnes afin de traverser, sans les fragiliser, les fondations existantes. La machine a ensuite été transférée en extérieur, puis rapatriée une dernière fois à l'intérieur, afin de réaliser le solde

des colonnes, sous les six poteaux existants et sur une partie de la façade sud-est.

Il s'agissait, en effet, de la zone où avait été construite la charpente boisée lors des travaux de sécurisation (figure 17).

Celle-ci avait, bien entendu, été démontée au dernier moment, une fois le bâtiment renforcé au maximum. À noter que des interventions sur les superstructures étaient prévues pour accompagner cette phase de travaux confortatifs en gommant les conséquences esthétiques et structurelles des désordres. Les réseaux de recueil des eaux, très fuyards, seront par ailleurs entièrement repris, ainsi que les sols extérieurs et intérieurs.

Dans l'église, seule une « mise en propreté » des intérieurs sera réalisée, d'importants travaux ayant été déjà effectués entre les deux guerres.

Il ne s'agissait donc pas, à proprement parler, d'une restauration mais d'une remise en état de ce petit édifice au cachet si peu parisien. Quant au mur de soutènement du cimetière, il a été remis à neuf. Reconstitué en béton armé (50 cm d'épaisseur), il est à présent fondé sur une semelle en L reposant sur une quarantaine de micropieux ancrés à 12 m de profondeur (diamètre 88,9 mm). Il est doublé par un parement en meulière de récupération pour les parties visibles. □

16- Forage à l'intérieur de l'église.

17- Charpente boisée.

16- Drilling inside the church.

17- Wooden structure.

FICHE TECHNIQUE

PROPRIÉTAIRE : Mairie de Paris - Direction des Affaires Culturelles

MAÎTRE D'OUVRAGE : DAC Sous-Direction du Patrimoine et de l'Histoire / Département des Édifices Culturels et Historiques

MAÎTRE D'ŒUVRE : Jean-François Lagneau, Architecte en Chef des Monuments Historiques

COORDONNATEUR SPS : Tilalys Architectes

BUREAU DE CONTRÔLE TECHNIQUE : Preventec

BUREAU D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUES : Botte Sondages

ENTREPRISES : Groupement Degaine / Soletanche Bachy

ABSTRACT

JET GROUTING FOR AN ENDANGERED MONUMENT AT SAINT-GERMAIN DE CHARONNE

ROBERT PORET, SOLETANCHE BACHY - JEAN-FRANÇOIS LAGNEAU

Saint-Germain de Charonne church, in the heart of the village of Charonne in the 20th arrondissement of Paris, is an historic monument built between the 15th and 18th centuries. This building, located on the southern face of a very steep hillside, has a structural history which testifies to chronic instability. Recurrent consolidation works have always been necessary. Closed to the public since December 2009, after the appearance of large cracks, the building is now undergoing a consolidation project designed to save it from certain collapse. The works involve re-establishing the church on sound supports by looking for the geological layer having the best load-bearing capacity at a depth of about ten metres. Underpinning is performed using the jet grouting process. The 190 columns executed (diameters 0.80 and 1 m) allow firm supports to be created under the existing masonries. □

JET-GROUTING PARA MONUMENTO EN PELIGRO EN SAINT-GERMAIN DE CHARONNE

ROBERT PORET, SOLETANCHE BACHY - JEAN-FRANÇOIS LAGNEAU

La iglesia de Saint-Germain de Charonne, situada en el centro del pueblo de Charonne, en el distrito XX de París, es un monumento histórico construido entre los siglos XV y XVIII. Este edificio, implantado en el lado sur de una ladera muy escarpada, tiene una historia estructural que atestigua una inestabilidad crónica. Siempre ha sido necesario realizar obras de consolidación recurrentes. Cerrado al público desde diciembre de 2009 debido a la aparición de importantes grietas, actualmente el edificio es objeto de un proyecto de consolidación destinado a salvarlo de una ruina segura. Las obras consisten en reasentar la iglesia sobre apoyos adecuados buscando la capa geológica con mayor capacidad de sustentación a unos diez metros de profundidad. El recalce de cimientos se efectúa según el procedimiento de jet grouting. Las 190 columnas realizadas (diámetro 0,80 y 1 m) permiten crear sólidos apoyos bajo las obras de fábrica existentes. □