



1
© CÉDRIC HELSLY

REPRISE EN SOUS-ŒUVRE PAR JET GROUTING DU CHÂTEAU DE VILLERS-COTTERÊTS

AUTEURS : MARIANNE AGUIE, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE -
AURÉLIEN PENIGUEL, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, SOLETANCHE BACHY FRANCE

SOLETANCHE BACHY FRANCE, EN GROUPEMENT AVEC BATI-IDF, EST INTERVENU FIN DE L'ANNÉE 2020 SUR LE PROJET DE CONSTRUCTION DE LA CITÉ INTERNATIONALE DE LA LANGUE FRANÇAISE, AU CHÂTEAU DE VILLERS-COTTERÊTS (02). LES TRAVAUX PORTAIENT SUR LA REPRISE EN SOUS-ŒUVRE D'UNE PARTIE DU CHÂTEAU PAR DES COLONNES DE JET GROUTING, ET SUR LA MISE EN ŒUVRE DE MICROPIEUX DE FONDATION DE FUTURS OUVRAGES NEUFS.

CONTEXTE GÉNÉRAL ET IMPLANTATION

Le château de Villers-Cotterêts, dans l'Aisne, est un château Renaissance construit par le roi François 1^{er} entre 1532 et 1556, partiellement sur les fondations d'un ancien château médiéval ruiné. En août 1539, il est le lieu de signature de l'ordonnance dite de Villers-Cotterêts, qui établit l'utilisation de la langue française dans les actes légaux et notariés : il s'agit du plus ancien texte législatif encore en vigueur en France, ses articles 110 et

111 concernant l'usage de la langue française n'ayant jamais été abrogés. Lors de la Révolution, le château devient brièvement une caserne de l'armée républicaine ; puis il est transformé en dépôt de mendicité en 1808 pour les mendiants du département de la Seine. Le château devient ensuite une maison de retraite pour la ville de Paris en 1889, jusqu'à sa fermeture en 2014. Muré et laissé à l'abandon depuis, il sort de l'oubli lors de la campagne d'Emmanuel Macron, en 2017, lorsqu'il s'engage à en faire "l'un des

**1- Vue
d'ensemble.**

**1- General
view.**

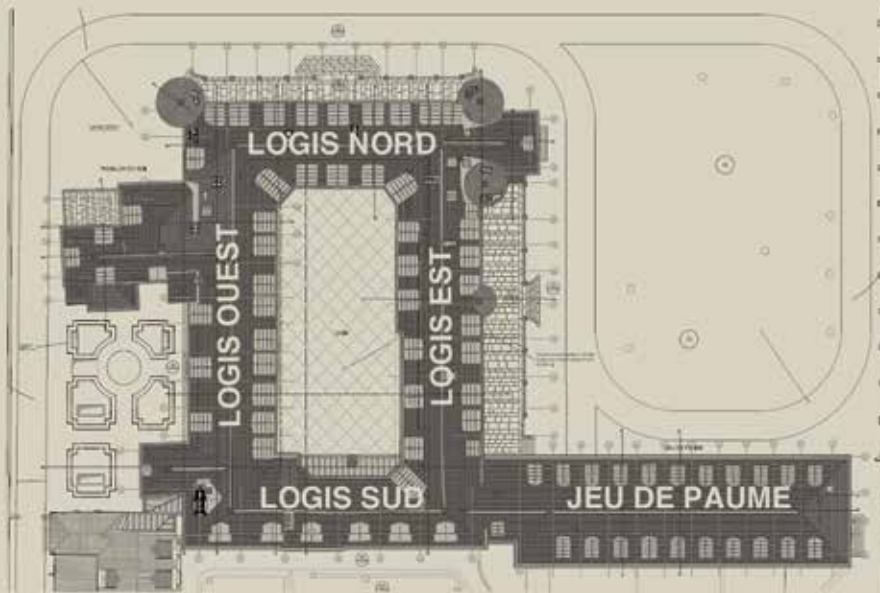
pilliers symboliques de notre francophonie" s'il est élu.

Le chantier de la future Cité internationale de la langue française démarre au début de l'année 2020, avec l'arrivée du premier lot dédié à la logis-

tique du chantier (figure 1). Le Centre des Monuments Nationaux, maître d'ouvrage du projet, a désigné le groupement Soletanche Bachy France (mandataire)/Bati-Idf pour le lot des fondations spéciales.

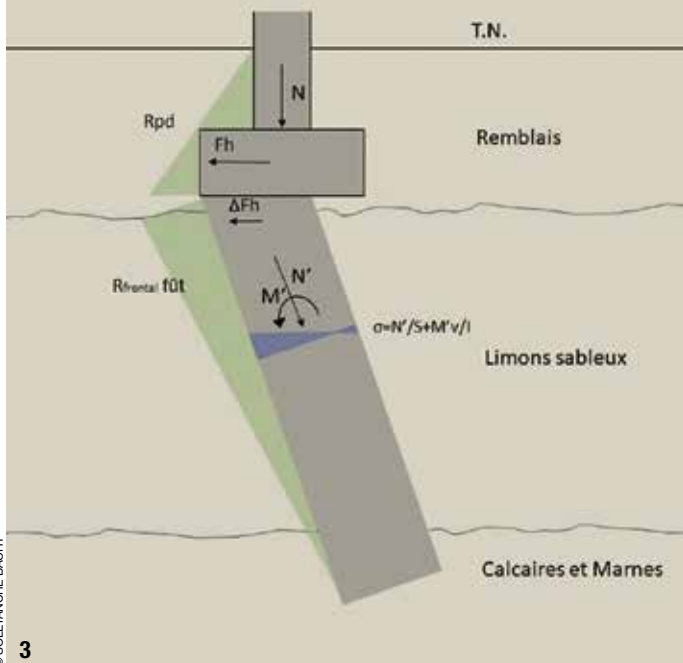
Les travaux de fondations spéciales portent sur le Logis Royal, et plus particulièrement l'aile Nord (figure 2). Deux types de travaux ont été réalisés : dans un premier temps, la reprise en sous-œuvre de l'aile Nord au moyen de colonnes de jet grouting, puis les fondations pour les futurs ascenseurs

PLAN GÉNÉRAL DE SITUATION



2

SCHÉMA D'UNE COLONNE DE JET GROUTING SOUS LA FONDATION



3

neufs par micropieux, répartis dans les différentes ailes du Logis.

Le diagnostic préalable de la structure identifiait l'existence de désordres importants dans l'aile Nord du Logis, et des fouilles de reconnaissance ont mis en évidence une hétérogénéité des fondations, tant en termes de profondeur que de largeur d'assise, certaines datant de la construction de

la Renaissance et d'autres de l'époque médiévale. Ces constats ont montré la nécessité d'une reprise en sous-œuvre des fondations de l'aile Nord, envisagée par deux méthodologies. La base consistait à forer des micropieux de part et d'autre des murs à reprendre, ensuite liaisonnés entre eux et à la structure par une longrine. La variante, retenue pour l'exécution, consistait à

créer des colonnes de mélange sol-ciment par la technique de jet grouting, celle-ci offrant l'avantage, par rapport à la base, d'éviter des travaux de gros-œuvre lourds avec des terrassements par passes alternées, et des traversées des maçonneries de fondations existantes pour créer les longrines de répartition.

La reprise en sous-œuvre a été effectuée avec 78 colonnes de jet grouting, réparties sous les murs de façades et de refends de l'aile Nord. La méthode retenue était le jet simple, avec utilisation du procédé Jetplus® : le moniteur Jetplus® est un outillage permettant, à énergie de jet égale, d'obtenir un diamètre de colonne plus important qu'avec une technique de jet grouting classique. Les micropieux concernaient 4 ouvrages neufs : la future terrasse Nord du château, ainsi que 3 futures

cuvettes d'ascenseurs situées aux intersections entre les ailes.

La contrainte de planning est forte pour ce projet, une partie de la Cité devant être inaugurée en avril 2022. Les coactivités et l'organisation avec les autres lots présents sur le chantier ont donc été importantes, toutes les activités ayant été lancées en parallèle sur les différentes ailes du château pour pouvoir respecter le délai de fin des travaux.

DIMENSIONNEMENT DES COLONNES DE JET GROUTING

L'objectif des études de dimensionnement est de définir la géométrie des colonnes : nombre, inclinaison, diamètre et profondeur. Trois valeurs de diamètre ont été définies : 1,20 m, 1,50 m et 1,80 m ; et on se laisse la possibilité de faire varier le diamètre en profondeur pour une même colonne. L'inclinaison est probablement le paramètre le plus sensible à définir : il dépend principalement de la distance entre la plate-forme de forage et l'arase inférieure des fondations existantes, ainsi que de l'encombrement de la tête de forage par rapport à un voile existant.

Concernant la profondeur, il était nécessaire de chercher la portance du substratum, un ancrage minimum de 50 cm dans la couche de Calcaire et Marne a donc rapidement été fixé (soit une base des colonnes à 128 NGF ou plus profond).

Les données d'entrée disponibles sont la nouvelle descente de charge du projet et la géométrie des massifs de fondation existants. Les géométries étaient pour la plupart disponibles dans le dossier du marché, puisqu'une campagne de fouilles avait été menée ; cependant, il a été décidé de mener quelques reconnaissances complémentaires (reconnaissance radar et fouille physique). Une meilleure connaissance de l'existant permet en effet d'ajuster au mieux les géométries de colonnes.

La géologie était précisée par de nombreux sondages disponibles dans la zone du bâtiment "Logis" (essais pressiométriques et pénétrométriques). La stratigraphie retenue est la suivante :

- 3,5 m de remblais en tête, base à 134 NGF (pl* non définie) ;
- 2 m de limons médiocres, base à 132 NGF (pl* = 0,3 MPa) ;
- 3,5 m de limons compacts, base à 128,5 NGF (pl* = 0,8 MPa) ;
- 12 m mini de Calcaires et Marnes, base non connue (pl* = 2,3 MPa). ▷

2- Plan général de situation.
3- Schéma d'une colonne de jet grouting sous la fondation.

2- General location drawing.
3- Diagram of a jet grouting column under the foundation.



4

© CÉDRIC HELSLY

4- Installations de chantier.

5- Exemple de coupe d'exécution.

4- Site facilities.

5- Example of work cross section.

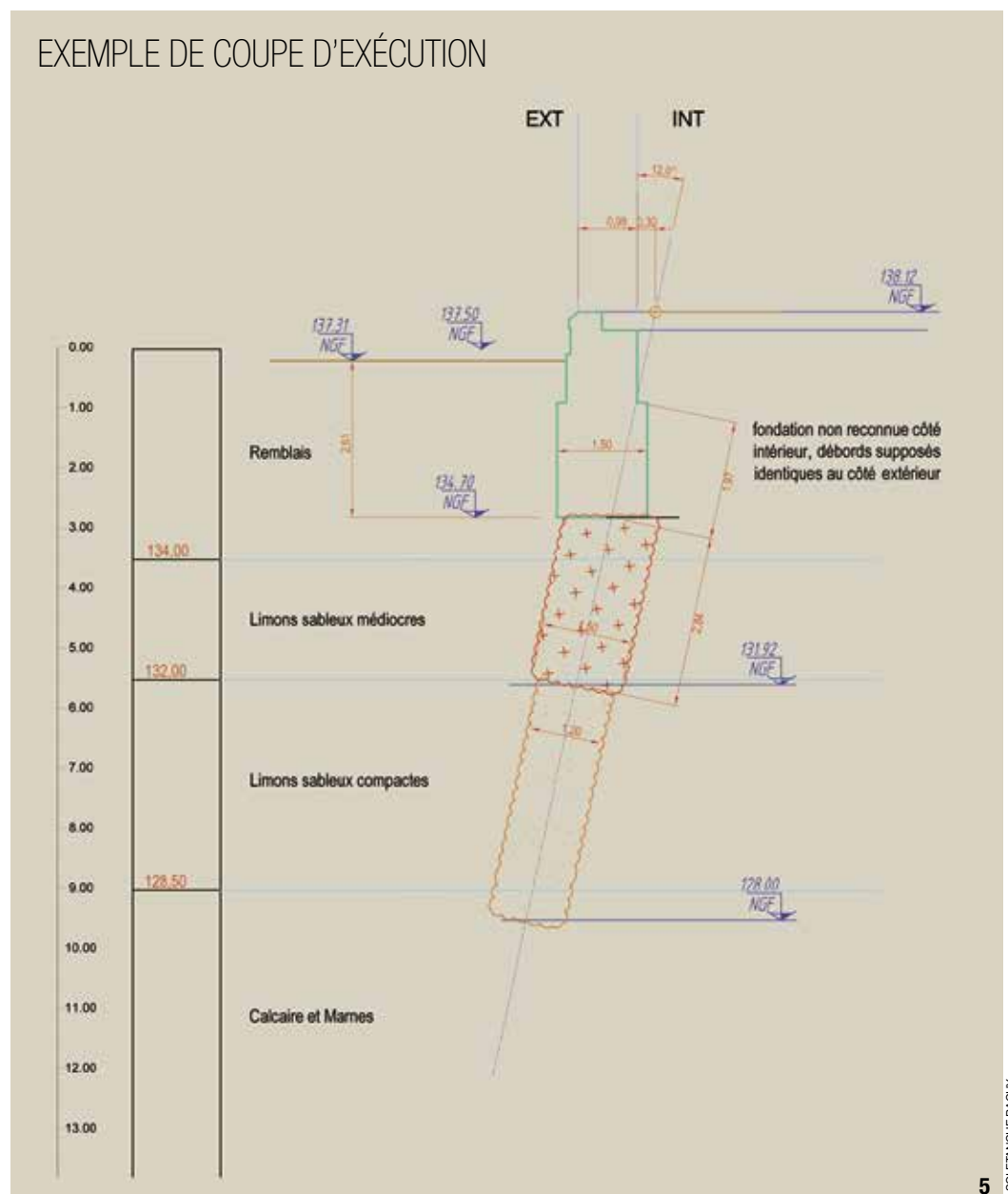
La nappe a été repérée à +105 NGF, soit à des profondeurs qui ne concernent pas les colonnes de jet.

Les colonnes de jet du projet sont soumises à des efforts verticaux de compression centrés sur l'axe du mur existant ; la descente de charge ne présente en effet aucun effort horizontal et aucun moment à reprendre en tête de colonne de jet.

Dans le cas des colonnes de jet grouting, et en référence à ce qu'on fait généralement en soil mixing, on applique les coefficients pour "pieux forés simples" (classe 1, catégorie 1 au sens de la norme NF P94-262) et on utilise les valeurs de q_s donnés par les abaques ainsi que les coefficients Y_{rd1} Y_{rd2} correspondant aux pieux en compression, en l'absence d'essais de portance.

L'étude de la portance est ainsi relativement rapide, puisque toutes les colonnes traversent les mêmes couches de terrain. Avec un ancrage minimum de 0,50 m dans la couche de Calcaire et Marnes (hypothèse de départ) et en considérant un diamètre minimum de 1,20 m toute hauteur, on justifie toujours les charges du projet.

EXEMPLE DE COUPE D'EXÉCUTION



5

© SOLETANCHE BACHY

L'étape suivante consiste à vérifier la géométrie des colonnes, notamment à vérifier que la contrainte verticale de compression au contact de la maçonnerie de la semelle existante reste inférieure à 1 MPa : ce critère était imposé par le CCTP, afin d'éviter de concentrer les efforts dans la maçonnerie existante. Cette vérification se fait en plusieurs étapes :

- On évalue la surface S de contact avec la maçonnerie existante en tête de colonne (en fonction de l'inclinaison par rapport à la verticale, du diamètre de tête choisi et de la hauteur de la plate-forme de forage par rapport à l'arase inférieure des fondations existantes) ;
- On définit l'excentrement "e" de la charge, distance entre l'axe des colonnes et l'axe du mur existant, en sous-face de semelle existante. Ceci afin de calculer le moment d'excentrement des charges en tête de colonne ($M=N \cdot e$) ;
- On calcule la contrainte de compression verticale en tête $\sigma = N/S$;
- On calcule la contrainte de flexion verticale en tête $\sigma = Mv/I$;
- Puis on vérifie que la somme $\sigma = N/S + Mv/I < 1 \text{ MPa}$ ($=100 \text{ t/m}^2$).

Cette méthode de vérification permet de s'assurer qu'un cheminement des contraintes est bien géométriquement possible et que les contraintes engendrées en tête sont admissibles.

La dernière étape consiste à vérifier la reprise des efforts horizontaux dus à l'inclinaison des colonnes dans le terrain.

Cette vérification se fait en plusieurs étapes :

- On évalue l'effort horizontal F_h à l'ELS cara : $F_h = N \cdot \tan \alpha$ (où α est l'angle d'inclinaison des colonnes par rapport à la verticale) ;
- On évalue ensuite l'effort résistant frontal de la fondation existante en butée dans le terrain Rpd, butée de type Rankine ;
- On évalue le résidu d'effort horizontal non repris en butée au droit de la fondation existante ΔF_h ;

6- Vue d'ensemble de la façade Nord.

6- General view of the North facade.

→ Puis on étudie le comportement transversal du fût de colonne (avec diamètre 1,20 m conservatif) en appliquant les lois de réaction frontale de l'Annexe I de la norme NF P94-262 (étude réalisée avec le logiciel interne Picasso de Soletanche Bachy).

L'effort horizontal résiduel ΔF_h , appliqué en tête de colonne, crée un moment M' dans le fût de colonne :

- On calcule la contrainte de compression verticale dans le fût $\sigma = N/S$;
- On calcule la contrainte de flexion verticale dans le fût $\sigma = M'v/I$;
- Puis on vérifie que la somme $\sigma = N/S + M'v/I < 2,5 \text{ MPa}$ ($= 250 \text{ t/m}^2$) qui valide la reprise du résidu ΔF_h dans la hauteur du fût de colonne (figure 3).

L'état limite ultime de compression du matériau jet grouting est en effet vérifié avec le même niveau de sécurité que s'il s'agissait d'un béton, ce qui revient à écrire, conformément à l'Eurocode 2 : $1,35 \sigma < f_{ck} / 1,5$.

Soit approximativement $\sigma < f_{ck} / 2$, où f_{ck} est la valeur caractéristique de la résistance en compression du matériau jet grouting à l'âge où s'exerce la

sollicitation (valeur retenue $R_c = 5 \text{ MPa}$) Enfin, concernant les déplacements horizontaux, ceux-ci ont été évalués en suivant les lois de réaction frontale de l'Annexe I de la norme NF P94-262 (logiciel interne Picasso). Les études ont conclu à des déplacements inférieurs au centimètre, ce qui est admissible pour ces bâtiments historiques.

TRAVAUX DE JET GROUTING ESSAIS PRÉALABLES ET TRAVAUX PRÉPARATOIRES

Les travaux ont démarré avec l'installation de la centrale de fabrication de coulis et la création de fosses à spoils hors sol, au moyen de murs préfabriqués, afin de créer un stockage suffisant pour la gestion des spoils tout en respectant une contrainte d'espace d'installation limité. L'atelier de jet grouting travaillant en deux postes pendant la production, la mise en place de fosses adaptées était d'autant plus importante (figure 4). Dans un premier temps, un plot d'essai constitué de 4 colonnes de jet grouting a permis de tester plusieurs jeux de paramètres de jet et de vérifier que ceux-ci permettaient bien d'atteindre les diamètres déterminés lors du dimensionnement. ▷





© CEDRIC HELISLY 7

Celles-ci ont toutes fait l'objet d'un contrôle de diamètre dans la colonne fraîche par mesure Cyljet® (cylindre électrique) et d'un carottage de contrôle de la continuité de la colonne et de la résistance du mélange sol-ciment.

Des reconnaissances supplémentaires ont également été effectuées, afin de confirmer certaines géométries de fondations qui étaient encore incertaines. À l'issue de ces reconnaissances et du dimensionnement des colonnes de jet grouting, neuf combinaisons différentes de tailles de colonnes et de coupe des fondations sont retenues pour l'exécution (voir un exemple de coupe en figure 5) : les inclinaisons des colonnes varient entre 10° et 20° et leurs profondeurs entre 10 et 11 m.

À l'issue des essais préalables, les avant-trous à travers la maçonnerie pour les futures colonnes de jet grouting ont été forés au moyen d'une foreuse équipée d'une tête permettant l'utilisation du procédé Hi'Drill®.

Ce dernier permet d'augmenter la vitesse de forage en conjuguant les effets de rotation et translation d'une tête traditionnelle avec ceux de résonance d'une tête Hi'Drill®. Il permet également de limiter les vibrations

subies par l'ouvrage durant le carottage.

Un carottage propre et de diamètre suffisant (dans ce cas, diamètre de 200 mm) à travers la maçonnerie était nécessaire afin d'assurer une bonne cheminée de remontée des spoils, avec un espace annulaire suffisant pour ne pas créer de bouchon. De plus, les avant-trous ont été équipés de tubes PVC sur la hauteur de la maçonnerie, afin d'éviter des divagations de coulis ou de spoils à travers les fondations.

TRAVAUX PRINCIPAUX DE JET GROUTING

Une fois les paramètres de jet grouting validés, et les avant-trous des premières colonnes finis, la production des colonnes de jet grouting a pu démarrer, avec une organisation à un atelier en deux postes. Les colonnes étaient à réaliser soit depuis l'extérieur, pour les colonnes situées sous les murs de façades (figure 6) ; soit depuis l'intérieur pour les colonnes situées sous les murs de refend.

Les activités de jet grouting étaient en interface forte avec le lot d'échafaudages pour les colonnes extérieures, ceux-ci devant être montés à la suite

7- Foreuse C4, en façade.

7- C4 driller, on the facade.

de l'atelier de jet grouting, dès que ce dernier libérait des zones suffisantes ; et avec le lot de déplombage/désamiantage/curage pour les colonnes intérieures, celui-ci devant mettre en place des confinements à l'intérieur pour ses activités.

À la fois à l'extérieur et à l'intérieur, les équipes ont fait preuve d'un soin particulier pour préserver, soit des vestiges archéologiques, soit des lambris sculptés en bois à conserver sous lesquels des colonnes étaient implantées.

C'est une foreuse Casagrande C4, équipée d'une flèche longue adaptée au jet grouting, qui a démarré par les colonnes extérieures (figure 7).

Les colonnes étaient exécutées suivant un phasage de colonnes primaires, puis de colonnes secondaires : la portance d'une colonne étant nulle à la fin de sa réalisation, avant que la prise du spoil ne démarre, ce phasage est nécessaire afin de ne pas créer de surfaces non

portantes trop importantes qui déstabiliseraient la structure existante.

Pour les colonnes intérieures, une foreuse Comacchio MC4D a été mobilisée (figure 8) : elle a fait l'objet d'une adaptation spécifique pour les besoins de ce chantier, n'ayant encore jamais été utilisée en configuration jet grouting.

La centrale était composée d'un ensemble de fabrication Tecniwell TWM30 avec ses silos horizontaux additionnels et d'une pompe à jet Tecniwell TW600.

Les paramètres de jet grouting ont fait l'objet d'adaptations au cours du chantier, les spoils remontés lors des premières colonnes étant très épais : les travaux étant menés sous une structure existante déjà endommagée, une attention particulière a été portée à la bonne remontée des spoils afin de ne pas créer de bouchons ni de potentiels désordres supplémentaires sur le château.

Les colonnes ont ensuite été contrôlées par Cyljet® pour le contrôle du diamètre dans les colonnes fraîches et par carottages pour le contrôle de la continuité de la colonne et des résistances atteintes.



© CEDRIC HELSLY
8

la future terrasse Nord du château, ainsi que sous 3 futurs ascenseurs.

Des essais préalables ont également été faits pour les micropieux : 4 micropieux ont été forés, 2 d'entre eux étant scellés dans les limons compacts et les 2 autres dans les Calcaires et Marnes. Ils ont ensuite été testés à la rupture afin de déterminer les résistances dans ces couches, les frottements étant négligés dans les remblais et les limons médiocres.

Les micropieux dimensionnés étaient de type III, en diamètre 150 mm, et de profondeurs variant entre 11 m et 13 m. Ils ont été autoforés, au tricône perdu.

L'exécution de ces micropieux nécessitant des déplacements à travers les pièces du château, c'est de nouveau une foreuse compacte Comacchio MC4D qui a été mobilisée, cette fois en configuration de forage classique. Une petite centrale autonome a permis de fabriquer le coulis C/E=2.

Les travaux de jet grouting et de micropieux ont été achevés à temps pour les fêtes de fin d'année 2020. Une deuxième intervention du groupement sera programmée au début de l'année 2022 pour la longrine de liaisonnement des micropieux de la terrasse Nord. □

MICROPIEUX POUR OUVRAGES NEUFS

En complément des colonnes de jet grouting, 29 micropieux de fondations d'ouvrages neufs ont été réalisés, sous

8- Foreuse MC4D, en intérieur.

8- MC4D driller, inside.

PRINCIPALES QUANTITÉS

COLONNES DE JET GROUTING : 78 unités jusqu'à 11 m de profondeur
MICROPIEUX TYPE III : 29 unités jusqu'à 13 m de profondeur

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE :

Centre des Monuments Nationaux

MAÎTRE D'ŒUVRE : Olivier Weets Acmh

BUREAU D'ÉTUDES STRUCTURE :

Bureau Michel Bancon

GÉOTECHNICIEN : Ginger

BUREAU DE CONTRÔLE : Bureau Veritas

ENTREPRISES TRAVAUX :

Groupement Soletanche Bachy France (mandataire) / Bati-Idf

ABSTRACT

UNDERPINNING BY JET GROUTING, VILLERS-COTTERETS CASTLE

MARIANNE AGUIE, SOLETANCHE BACHY - AURÉLIEN PENIGUEL, SOLETANCHE BACHY

The Soletanche Bachy/Bati-Idf consortium worked on the project for creation of the International City for the French Language in Villers-Cotterêts castle, executing the special foundations work section. Two types of works were performed: first, underpinning of part of the castle by jet grouting columns, by inclined drilling through the existing foundation masonries, and second, the creation of foundations for new structures (lifts, terrace) by means of type III self-drilling micropiles. The works were performed with an organisation in two shifts and extensive concurrent work, in order to comply with the constraint of the very tight schedule. □

RECALCE POR JET GROUTING DEL CASTILLO DE VILLERS-COTTERETS

MARIANNE AGUIE, SOLETANCHE BACHY - AURÉLIEN PENIGUEL, SOLETANCHE BACHY

El consorcio Soletanche Bachy/Bati-Idf ha intervenido en la obra de creación de la Ciudad internacional de la lengua francesa en el castillo de Villers-Cotterêts para la ejecución del lote de cimentación especial. Se han llevado a cabo dos tipos de obras: por una parte, el recalce de una parte del castillo mediante columnas de jet grouting, perforadas de forma inclinada a través de la mampostería de los cimientos existentes y, por otra, la creación de cimientos para nuevas construcciones (ascensores, terraza) mediante micropilotes autopercorados de tipo III. Las obras se han organizado en dos unidades con una importante coactividad para respetar las restricciones de una planificación muy ajustada. □