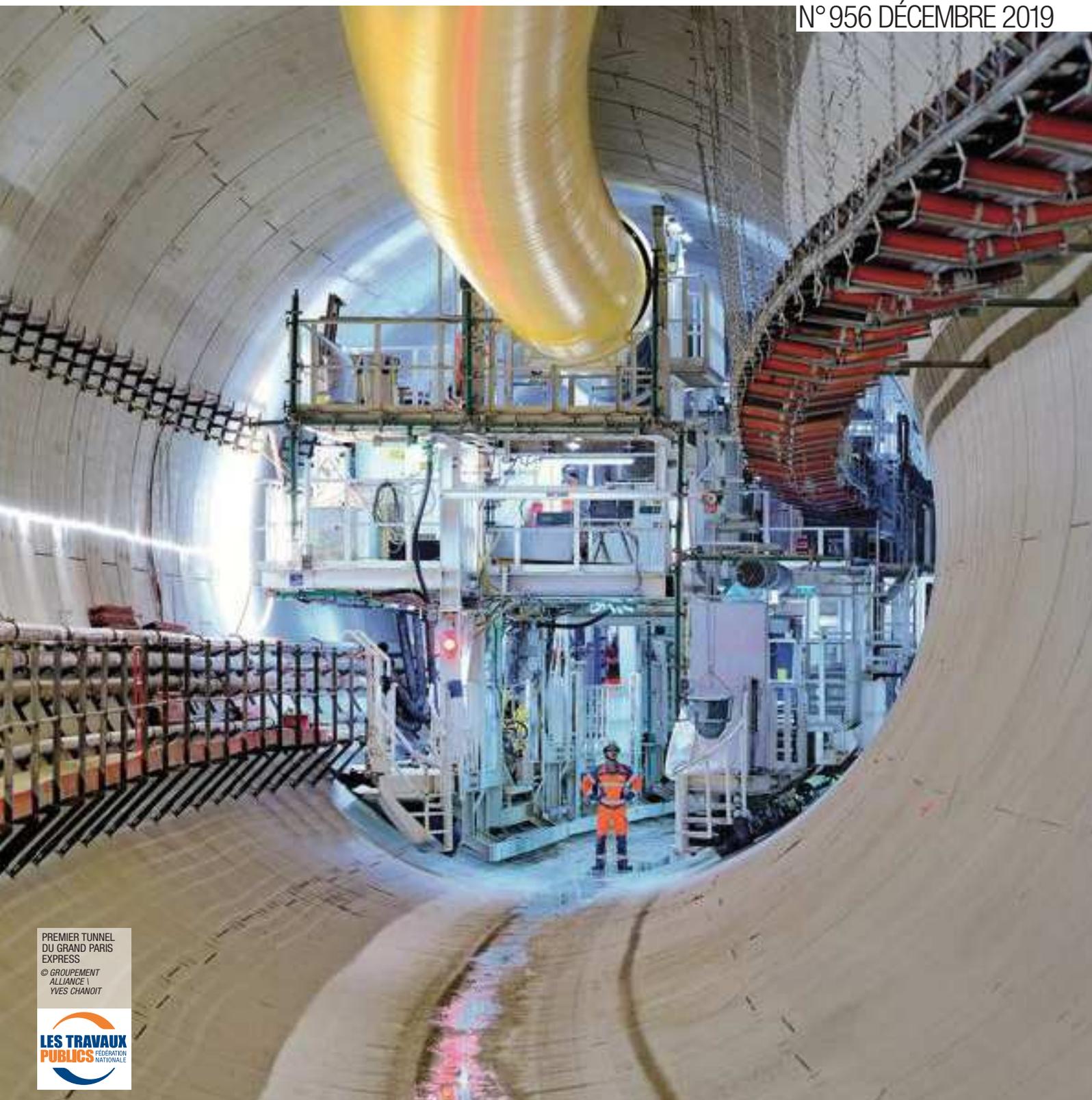


# TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**TRAVAUX SOUTERRAINS.** CERN PROJET HiLumi (HAUTE LUMINOSITE) LHC. OA1 : UN Puits DE RECEPTION DE TUNNELIER LIGNE 18 - AEROPORT PARIS-ORLY. AMELIORATION DE LA BUTEE DES PAROIS MOULEES - TRAMWAY DE NICE. GALERIE DES JANOTS. EXTENSION DE LA LIGNE 14 AU SUD DE PARIS. SECURISATION DU TUNNEL FERROVIAIRE DE MEUDON. PREMIER TUNNEL DU GRAND PARIS EXPRESS. RER EOLE : LA GARE PORTE-MAILLOT. LIGNE 14 : CONGELATION POUR PASSAGE SOUS LA GARE DE SAINT-OUEN

N° 956 DÉCEMBRE 2019



PREMIER TUNNEL  
DU GRAND PARIS  
EXPRESS

© GROUPEMENT  
ALLIANCE  
YVES CHANOIT



© ALEXANDRE SCIFIA

# LIGNE 14 : CONGÉLATION POUR LE PASSAGE SOUS LA GARE DU RER C DE SAINT-OUEN

AUTEURS : LOUIS DELMAS, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, SYSTRA - LAURENT BUISSART, DIRECTEUR DE CHANTIER, SPIE BATIGNOLLES GÉNIE CIVIL - CHRISTIAN GILBERT, DIRECTEUR B.U. STRUCTURES ET GÉNIE CIVIL, SYSTRA - GIORGIO FANTAUZZI, DIRECTEUR DU DÉPARTEMENT TUNNELS ET STRUCTURES SOUTERRAINES, SYSTRA

LA GARE DU RER C DE SAINT-OUEN EST FONDÉE SUR DES BARRETTES TRAVERSANT LES SABLES DE BEAUCHAMP. LE CROISEMENT AVEC LA LIGNE 14 DU MÉTRO PARISIEN A NÉCESSITÉ LA RÉALISATION D'UN TUNNEL INTERCEPTANT 3 DE CES BARRETTES ET ÉGALEMENT SITUÉ DANS LES SABLES DE BEAUCHAMP AVEC DE FAIBLES COHÉSIONS, SOUS 20 m D'EAU. LE CREUSEMENT A EU LIEU À L'ABRI D'UNE COQUE CONGELÉE ARTIFICIELLEMENT QUI A ASSURÉ LA STABILITÉ DES TERRAINS DANS UN CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDRAULIQUE PARTICULIÈREMENT COMPLEXE.

## REPRISE EN SOUS-CŒUVRE D'UNE GARE DE RER C

Clichy-Saint-Ouen (CSO), est une future station de métro de la Ligne 14 au nord de Paris qui se raccorde à la ligne RER C existante (figure 2). La station RER C a été construite en 1985 avec une tranchée couverte de 12 m de profondeur et 18 m de largeur. Le tracé de la Ligne 14N croise la station du RER C avec un angle de 26° ; le croisement fait 26 m de long (figure 3). Le quai central de la gare est fondé sur des barrettes de 15 m de long avec un espacement maximal de 4,5 m (figure 4). Les barrettes reposent en

pointe sur les Marnes et Caillasses à 27 m de profondeur.

La principale difficulté pour la construction de la station CSO a été de traverser sous le RER C (figure 3). Le RER C devait rester en service pendant toute la durée des travaux.

Deux puits ont été utilisés pour accéder sous le RER C : Au nord, un puits de ventilation (BAM : Baie d'Aération Mécanique) (~20 m x 20 m de surface ; 20 m de profondeur) et au sud, la station CSO (140 m x 15 m de surface ; 20 m de profondeur) (figure 4). Les puits BAM et CSO ont tous deux été utilisés pour des sorties de tun-

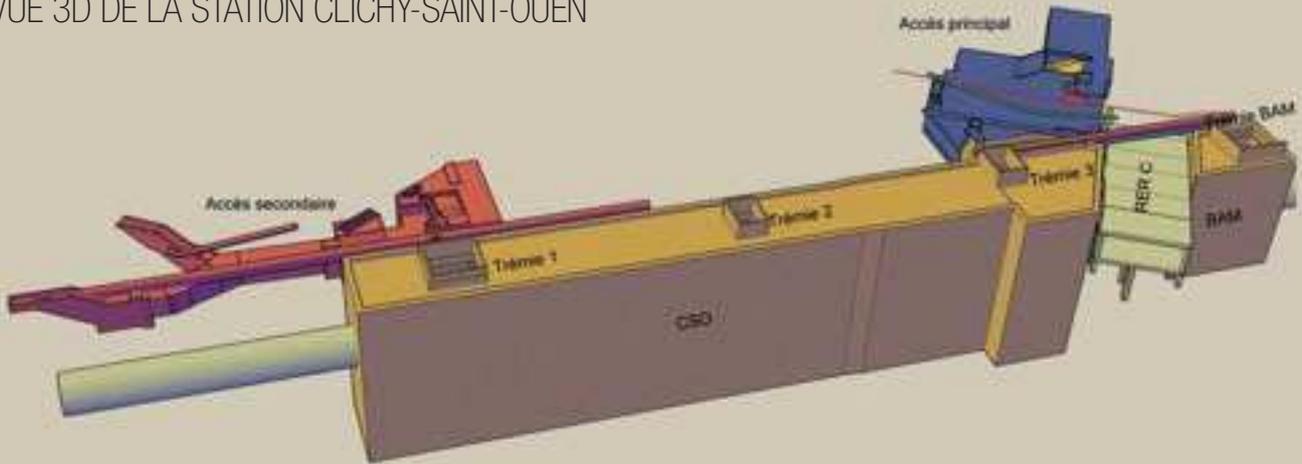
**1- Coque congelée en cours de congélation.**

**1- Frozen shell during ground freezing.**

neliers. Un ouvrage cadre a été conçu pour traverser sous le RER C (figure 5). L'emplacement des barrettes a imposé qu'une barrette soit coupée et que ses charges soient transférées à l'ouvrage cadre de la Ligne 14.

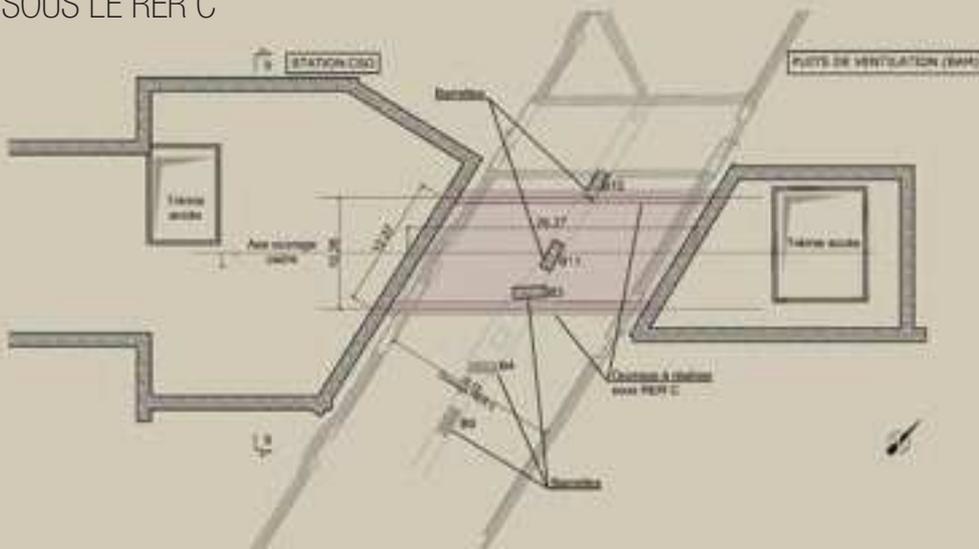
La reprise des efforts du RER C par l'ouvrage cadre s'est faite par l'ancrage de la barrette B11 à une poutre reposant sur les piédroits de l'ouvrage cadre (figure 5). La barrette B11 a ensuite été coupée. Cette solution impliquait de terrasser jusque sous le radier du RER C pour mettre à nu, puis étayer le système de fondation du RER C. Les parois moulées du RER C ont été fixées aux parois moulées des puits BAM et CSO par des linteaux (3 m de hauteur sur 12 m de largeur). Ceci a permis le creusement sous la fiche des parois moulées du RER C. La partie inférieure de la barrette B11 située sous le

## VUE 3D DE LA STATION CLICHY-SAINT-OUEN



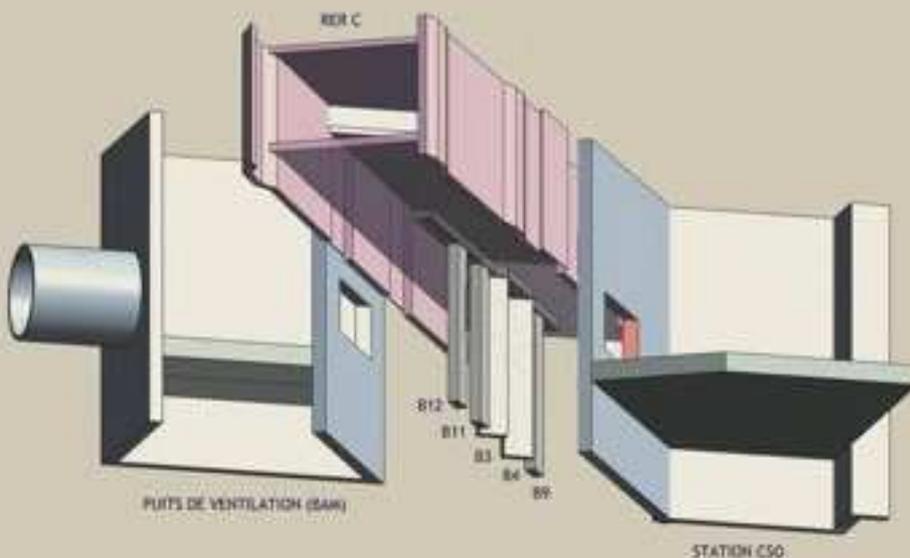
2

## VUE EN PLAN DE LA CONFIGURATION DU TUNNEL À CONSTRUIRE SOUS LE RER C



3

## VUE 3D SOUS LE RER C



4

2- Vue 3D de la station Clichy-Saint-Ouen.

3- Vue en plan de la configuration du tunnel à construire sous le RER C.

4- Vue 3D sous le RER C.

2- 3D view of Clichy-Saint-Ouen Station.

3- Plan view of the configuration of the tunnel to be constructed under RER C.

4- 3D view under RER C.

radier de l'ouvrage cadre a été abandonnée dans le terrain et n'est pas utilisée comme support (figure 6).

Ces opérations de reprise en sous-œuvre ont impliqué que le creusement soit réalisé par des méthodes traditionnelles. Le contexte géologique a nécessité l'utilisation de méthodes d'amélioration du sol telles que la congélation des sols.

### DES SABLES SANS COHÉSION, SOUS CHARGE D'EAU

L'ouvrage cadre est situé dans les horizons du Lutétien. Plus particulièrement, les sols suivants ont été rencontrés :

- Marno-Calcaire de Saint-Ouen (MCSO) : mélange de blocs calcaire et de marnes.
- Calcaire de Ducy (CDu) : couche très dure de calcaire fracturé (50-100 cm). Les fractures sont remplies d'argile brune.

- Sables de Beauchamp (SB) : sables verts de composition variable en Île-de-France. Au niveau de l'ouvrage ils comprennent 3 sous-unités. En partie supérieure et inférieure : sables limoneux, sans cohésion. En partie médiane : argile sableuse, faible cohésion. La perméabilité globale de cette formation est de  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  m/s. Elle n'est pas injectable, des essais d'injectabilité en phase d'études l'ont démontré.
- Marnes et Caillasses (MC) : mélanges de marnes avec des blocs calcaires pouvant contenir du gypse et/ou des zones de dissolutions.

Le terrain naturel se trouve à +31 m NGF et le niveau de la nappe se trouve à 5 m de profondeur soit à 26 m NGF. L'excavation de l'ouvrage cadre se situe dans les Sables de Beauchamp entre +6 m NGF et +16 m NGF. La pression maximum d'eau est de 200 kPa sous l'ouvrage cadre.

**CONCEPTION D'UNE COQUE CONGELÉE**

Le gabarit de l'ouvrage cadre se situe principalement dans les sables sans cohésion (SB) avec une pression d'eau de 100 à 200 kPa. La non-injectabilité de cette formation a conduit au choix de la congélation des

sols comme soutènement provisoire. La partie en "U" de la coque est conçue pour assurer la flottabilité pendant les phases d'excavation. La contre-voûte redirige la pression d'Archimède vers les murs gelés, les propriétés mécaniques des sols gelés doivent donc être compatibles avec les efforts internes dans la contre-voûte. La voûte centrale a pour but d'assurer la stabilité du toit lors de l'excavation des galeries basses. La méthode de congélation a été choisie pour la voûte centrale en phase conception. Il s'agissait de limiter le nombre de méthodes de traitement de sol utilisées en cours de chantier (figures 1 et 7).

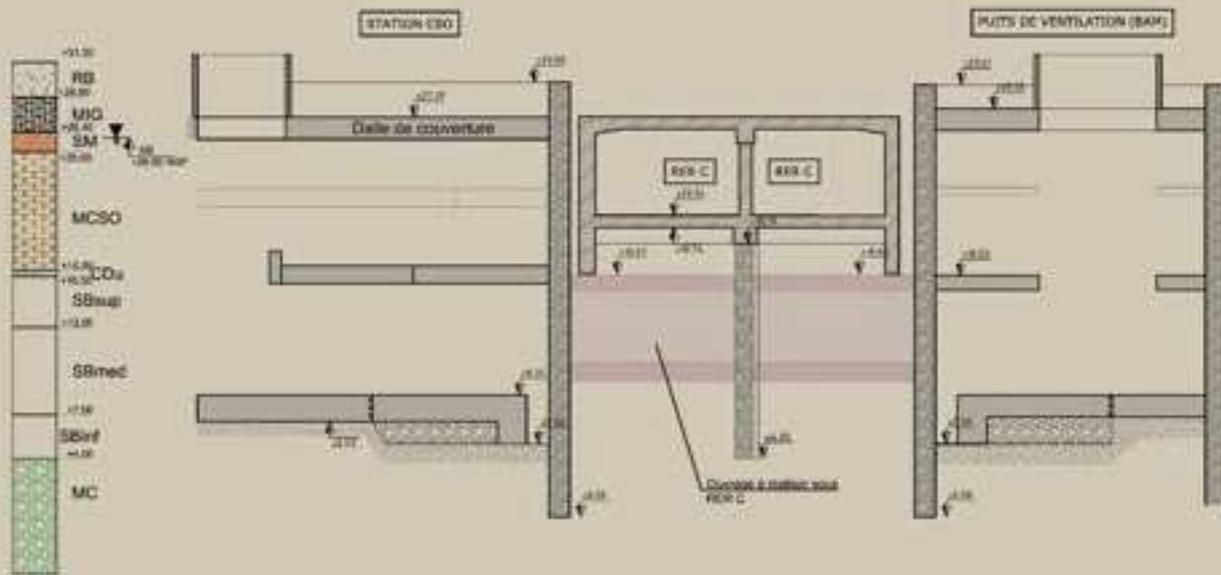
**5- Coupe longitudinale du tunnel à construire.**

**6- Coupe longitudinale du tunnel construit.**

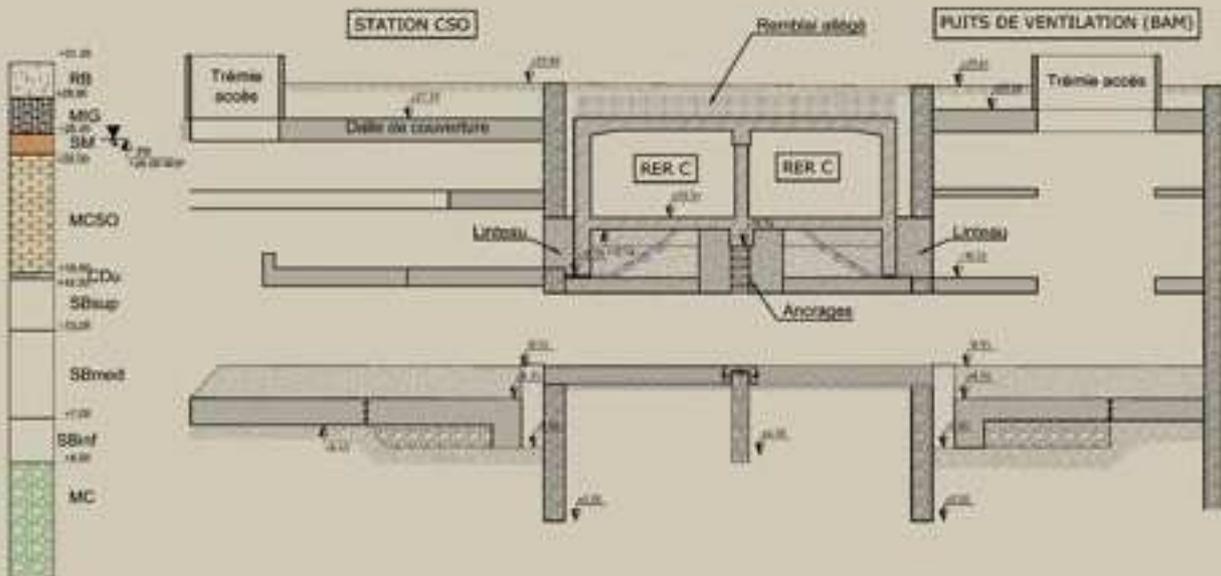
**5- Longitudinal section of the tunnel to be constructed.**

**6- Longitudinal section of the constructed tunnel.**

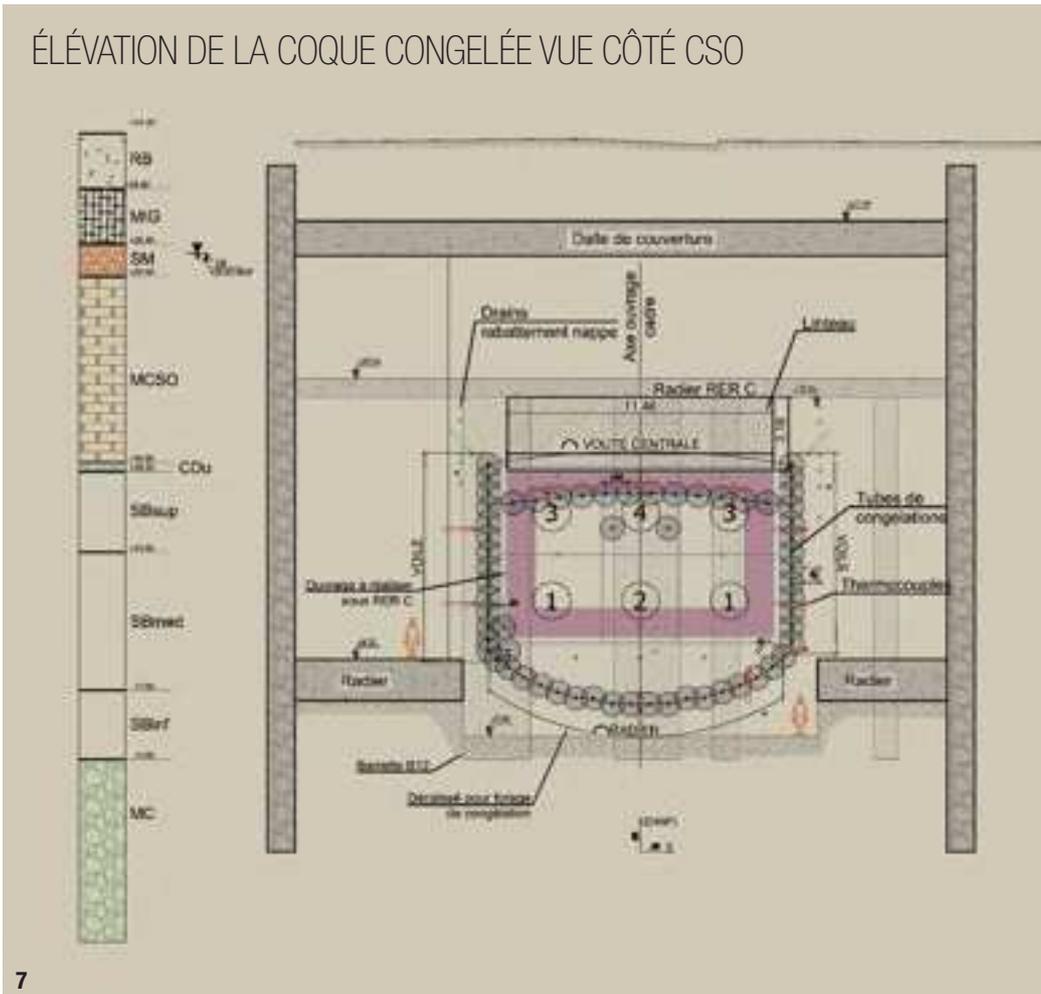
**COUPE LONGITUDINALE DU TUNNEL À CONSTRUIRE**



**COUPE LONGITUDINALE DU TUNNEL CONSTRUIT**



## ÉLÉVATION DE LA COQUE CONGELÉE VUE CÔTÉ CSO



© SYSTRA 7

L'excavation a été réalisée en sections divisées pour assurer la stabilité du soulèvement et la flottabilité pendant toute la durée des travaux. La séquence des travaux d'excavation était : (2) section centrale, (1) sections latérales inférieures, (3) sections latérales supérieures, (4) section centrale supérieure. La séquence d'avancement de l'excavation a été réalisée par pas de 1 m. La congélation a assuré le soutènement provisoire et l'étanchéité lors de l'excavation. Après chaque pas d'avancement, un soutènement provisoire (cadres HEM220 et béton projeté fibré) était installé derrière le front d'excavation. Le revêtement définitif a été installé à la fin de l'excavation de chacune des galeries (figure 8). Cette séquence d'excavation inhabituelle, de bas en haut, a été choisie pour assurer la stabilité du soulèvement au cours des travaux. À certaines étapes, le revêtement définitif était nécessaire pour assurer la non-flottabilité de l'ensemble. Pendant les phases d'étude, la stabilité au soulèvement au centre du tunnel n'était pas assurée à toutes les phases

### 7- Élévation de la coque congelée vue côté CSO.

#### 7- Elevation view of the frozen shell seen from CSO.

d'excavation. Pour satisfaire à cette condition de stabilité, un lestage des galeries inférieures a été mis en place lors de l'excavation des parties supérieures. Le radier de l'ouvrage cadre a également été ancré aux parois moulées BAM et CSO. Ces solutions ont permis d'équilibrer la poussée d'Archimède pendant toutes les phases d'excavation. Le Marno-Calcaire de Saint-Ouen n'est pas sujet à l'érosion interne (débouillage). Mais, pour éviter une infiltration excessive d'eau pendant l'excavation, des injections ont été réalisées en rideau de part et d'autre du "U". De plus, un réseau de drains a été placé entre le haut de la coque gelée et la base du RER C pour capter l'eau avant qu'elle n'entre dans l'excavation.

Les résistances mécaniques des terrains gelés ont été estimés à partir de données provenant de projets de congélation antérieurs, réalisés dans les mêmes formations géologiques. Les résultats des essais en laboratoire effectués sur un autre lot du prolongement de la Ligne 14, qui nécessitait également la congélation artificielle du sol, ont été utilisés (figure 9). Les contraintes dans la coque congelée ont été calculées pour toutes les phases d'excavation. Ceci a permis de fixer un critère d'épaisseur minimum de la coque congelée : 80 cm d'épaisseur à une température inférieure à  $-10^{\circ}\text{C}$ .

**UNE CONGÉLATION MIXTE AZOTE LIQUIDE - SAUMURE**

La congélation initiale a été effectuée grâce à un circuit ouvert, alimenté avec de l'azote liquide. Ceci a permis un développement rapide de la glace et l'atteinte du critère mécanique. L'entretien de la congélation a été effectué en circuit fermé avec de la saumure ( $\text{CaCl}_2$ ) à des températures comprises entre  $-37^{\circ}\text{C}$  et  $-25^{\circ}\text{C}$ , en fonction des besoins énergétiques de la paroi gelée

au cours du projet. Pour refroidir la saumure, une installation frigorifique de 500 kW a été utilisée (figure 10). Les tuyaux de congélation ont été forés horizontalement à partir des deux puits BAM et CSO. Les forages ont été réalisés sous sas. Les déviations maximales autorisées étaient de 2%. Les tubes de forage et des têtes de coupe ont été utilisés comme supports pour les tubes de congélation et abandonnés dans le sol. Des manchons en cuivre ont été scellés à l'intérieur des tubes de forage pour servir de surface d'échange entre la saumure et le sol. Un tube central a ensuite été installé à l'intérieur des tuyaux de congélation pour l'alimentation en fluide cryogénique. Les têtes des tubes de congélation ont été reliées aux circuits de distribution. Deux circuits ont été utilisés, un circuit ouvert pour l'azote liquide et un circuit fermé pour la saumure. Le réservoir d'azote liquide et les installations de refroidissement de la saumure étaient placés à la surface.

### ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS : ADAPTATION DU SÉQUENÇAGE DE CONGÉLATION

Une fois les parois moulées de CSO et BAM réalisées, des différences de niveaux piézométriques sont apparues entre le nord et le sud de la station. Un écoulement général existe de la nappe du sud vers le nord (de la colline de Montmartre à la direction de la Seine). Cette différence de niveau piézométrique de 0,5 m est la conséquence d'un effet barrage créé par la station. Un effet secondaire de cet effet barrage a été l'augmentation des vitesses d'écoulement sous le RER C, dans le goulot d'étranglement créé par les deux puits. Les vitesses d'écoulement sous le RER C ont été mesurées in situ avec un essai de traçage. Elles atteignent jusqu'à 18 m/jour sous le RER C. Cependant, seuls de petits volumes d'eau se déplacent à cette vitesse ; la vitesse d'écoulement globale s'est avérée inférieure à 0,5 m/jour. Deux chemins préférentiels ont été identifiés pour les grandes vitesses d'écoulement : d'une part, des hétérogénéités à l'interface sol/paroi moulée, d'autre part, la perméabilité élevée du calcaire de Ducy. Pendant le forage des drains, on a observé que l'eau était chargée en particules d'argile foncée. Il s'est avéré que cela provenait du remplissage des fractures dans le Calcaire de Ducy qui était emporté par délavage.



8

© SYSTRA

Il a ainsi été décidé que la congélation initiale à l'azote liquide devrait être phasée.

Le Calcaire de Ducy a donc été gelé en premier pour assurer la fermeture des lignes d'écoulement à grande vitesse et éviter l'amplification du phénomène de goulot d'étranglement.

La fermeture du Calcaire de Ducy a été vérifiée par une surveillance régulière de la température et à l'aide de drains situés au centre de la coque gelée.

Enfin, le reste de la coque en "U" a été congelé avec de l'azote liquide (figure 11).

Un essai d'érosion du "U" a été réalisé. L'essai d'érosion a consisté à créer

artificiellement un écoulement au-dessus du "U" en déchargeant les drains situés à l'intérieur et à surveiller l'évolution des températures dans le sol gelé. Les températures ont été surveillées pendant trois semaines. Aucune augmentation de température n'a été observée, même à des températures de saumure plus élevées (jusqu'à -28°C testé). Cela a amélioré la confiance dans la stabilité du corps gelé contre l'érosion thermique créée par les écoulements externes.

Enfin, la voûte centrale a d'abord été gelée à l'azote liquide, puis entretenue avec de la saumure, comme le reste de la coque.

Lors de l'excavation, les actions suivantes ont été prévues pour faire face au risque d'une augmentation soudaine de la température dans les bras du "U" :

- Ouverture des drains à l'extérieur de la coque congelée à pleine capacité pour rediriger l'eau avant qu'elle ne réchauffe la coque congelée ;
- Réduction de la température de la saumure au minimum de la capacité du groupe froid ;
- Finalement sans effet notable des actions précédentes, un réservoir plein d'azote liquide a été conservé sur site afin de revenir au refroidissement à l'azote liquide en dernier recours.

### MISE EN PLACE D'UN MODÈLE D'ANALYSE DES TEMPÉRATURES

Des chaînes de thermocouples ont été installées dans des forages dédiés. L'espacement longitudinal entre chaque thermocouple a été fixé à 2 m.

Afin de s'assurer que les critères mécaniques (températures inférieures à -10°C) sur une paroi de 80 cm d'épaisseur étaient vérifiés pendant toute la durée du projet, il a fallu extrapoler la position de l'isotherme -10°C à partir de la température mesurée de façon ponctuelle par chaque capteur.

L'hypothèse retenue est celle de Sanger et Sayles (1980) qui considèrent que la distribution de la température



9

© SYSTRA



10

© ALEXANDRE SORIA

**8- Terrassements à l'ouverture des galeries latérales basses.**

**9- Front dans les Sables de Beauchamp supérieurs (jaunes) et médians (verts).**

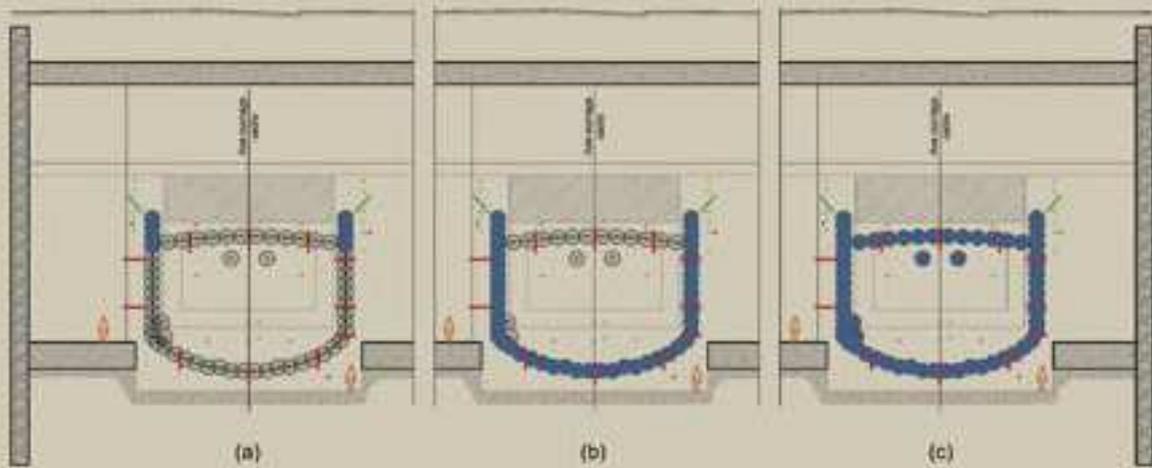
**10- Silos d'azote liquide et cheminée d'échappement.**

**8- Earthworks at the opening of the low side galleries.**

**9- Working face in the upper (yellow) and median (green) Beauchamp sands.**

**10- Silos of liquid nitrogen and exhaust stack.**

## SÉQUENÇAGE DE LA MISE EN FROID



© SYSTRA  
11

est logarithmique dans la partie gelée. Cette hypothèse a permis de relier la température mesurée par les capteurs à la position de tous les isothermes par rapport aux tubes de congélation et donc à l'épaisseur extrapolée de la coque en tout point. Grâce à cette hypothèse, un système d'alertes automatisées a été mis en place pour assurer la sécurité de la coque tout au long du chantier.

Ces seuils ont été utilisés pour piloter la congélation. En décembre 2018, le seuil de vigilance a été atteint sur un capteur situé près de la paroi moulée de la BAM. L'augmentation de température a été associée à plusieurs

**11- Séquençage de la mise en froid.**

**12- Vue 3D de la coque congelée sous le RER C et son interface avec les barrettes.**

**11- Sequencing of freezing.**  
**12- 3D view of the frozen shell under RER C and its interface with the barrettes.**

facteurs : la proximité du puits et les flux d'air de ventilation ; le bétonnage récent de la culée du tunnel et une température initiale du sol plus élevée dans cette zone. Ce dernier facteur avait été identifié au début du projet et était probablement dû à la circulation de l'eau sous le RER C.

Comme prévu, les actions correctrices ont été mises en œuvre, la température de la saumure a été baissée au minimum (-37°C) et les drains ont été ouverts complètement. Mais cela n'a pas été suffisant pour arrêter le réchauffement et relancer la croissance du mur gelé. La décision a été prise d'entretenir le froid avec de l'azote liquide.

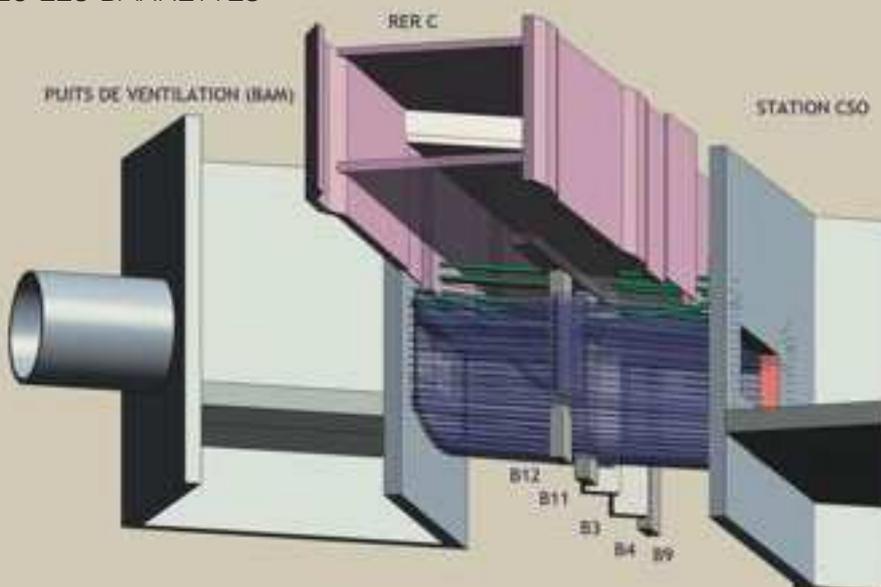
L'entretien à l'azote liquide a été réintroduit par des injections intermittentes (entre 4 et 8 heures par nuit, selon les besoins énergétiques). Un seuil spécifique a été mis en place pour s'assurer que les critères mécaniques étaient toujours vérifiés et son atteinte déclenchait une injection d'azote liquide. Après une période d'ajustement et d'étalonnage avec la réponse dynamique en température du sol, les injections ont été réalisées pendant la nuit pour limiter les interactions avec les travaux de génie civil.

### GONFLEMENTS CRYOGÉNIQUES ET SOULÈVEMENTS DU RER C

Le gonflement dû au gel dans le sol est consécutif à deux processus différents liés à la perméabilité des sols et à leur texture. D'une part dans les sols peu perméables, la dilatation de l'eau lors de son changement de phase ne peut pas s'accompagner par une évacuation de l'excédent volumique vers les parties non gelées. D'autre part, dans les sols limoneux, la fraction d'eau liée aux grains (forces de Van der Waals) favorise la succion cryogénique. Ce deuxième processus conduit à une augmentation constante du volume avec le temps.

Lors de la congélation initiale du "U" à l'azote liquide, un déplacement du poteau reposant sur la barrette B11 a été mesuré. Cela est probablement dû à la non-compatibilité entre l'avancée rapide du front de congélation pendant la congélation initiale à l'azote liquide (-196°C à -80°C) et la perméabilité des sables, ne leur permettant pas d'évacuer à temps l'excédent volumique formé par le changement d'état de l'eau dans les sables.

## VUE 3D DE LA COQUE CONGELÉE SOUS LE RER C ET SON INTERFACE AVEC LES BARRETTES



© SYSTRA  
12



13

© ALEXANDRE SORIA

Lors du passage à la saumure, à une température plus élevée (-35 °C à -28 °C), le soulèvement dû au gel s'est arrêté (figure 12). Pendant la congélation initiale à l'azote de la voûte centrale, le soulèvement a repris. Mais cette fois-ci, il ne s'est pas arrêté lors du basculement à la saumure. Dans ce cas, le soulèvement a été continu, lié à la succion cryogénique, probablement influencé par la teneur en limon des Marmo-Calcaires de Saint-Ouen et par l'apport continu d'eau sous le RER C (figure 13). Plusieurs actions correctrices ont été mises en œuvre, sans effets notables sur les soulèvements : ouverture complète des drains latéraux pour réduire les arrivées d'eau, augmentation de la température de la

saumure, arrêt de l'écoulement de la saumure dans les tuyaux de congélation de la voûte parapluie. La seule solution efficace a été d'abandonner la voûte congelée et de la faire fondre activement. Lors de l'excavation, des palpeilles ont été prévues pour assurer la stabilité du toit de l'excavation.

### CONCLUSION

La construction d'un tunnel de 26 m de long sur lequel repose le RER C a été marquée par de nombreux rebondissements tout au long du projet. La congélation artificielle des sols sous la forme d'une coque en forme de "U", sous un ouvrage en exploitation a entraîné des difficultés importantes. Le pilotage de la congélation a consisté à cher-

**13- Photo à la fin du terrassement des galeries latérales basses.**

**13- Photo at the end of earthworks on the low side galleries.**

cher l'équilibre entre deux contraintes contradictoires :

- Garantir la stabilité mécanique et l'étanchéité implique de travailler sous des températures basses ;
- La limitation des impacts sur les avoisinants nécessite des températures de sol gelé plus élevées.

La mise en œuvre sur site a dû être adaptée au contexte géologique complexe et s'est traduite par un succès grâce à l'implication de tous les acteurs du projet. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS LIGNE 14 NORD

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** RATP

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Systra

**GROUPEMENT D'ENTREPRISES :** Spie Batignolles (mandataire) / Botte fondations / Chantiers modernes construction / Dodin Campenon Bernard / Vinci Grand Projets / Icop SA.

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**PÉRIODE DES TRAVAUX :** De décembre 2014 à novembre 2019

**PAROIS MOULÉES :** 25 000 m<sup>3</sup>

**BÉTON DE STRUCTURE :** 30 000 m<sup>3</sup>

**ARMATURES :** 6 000 t

**NOMBRE DE FORAGES DE CONGÉLATION ET THERMOCOUPLES :** 145 u

**LONGUEUR CUMULÉE DES FORAGES POUR LES TUBES DE CONGÉLATIONS ET THERMOCOUPLES :** 1 900 m

**MISE EN FROID INITIALE DE LA COQUE :** 19 février 2018

**FIN DU DÉGEL DE LA COQUE :** octobre 2019

**VOLUME D'AZOTE POUR LA MISE EN FROID INITIALE :** 2,5 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>

**SOUTÈNEMENT OUVRAGE CADRE :** 300 t

### ABSTRACT

#### LINE 14: GROUND FREEZING FOR THE PASSAGEWAY UNDER THE SAINT-OUEN STATION OF RER C

LOUIS DELMAS, SYSTRA - LAURENT BUISSART, SPIE BATIGNOLLES - CHRISTIAN GILBERT, SYSTRA - GIORGIO FANTAUZZI, SYSTRA

As part of the extension of metro Line 14 toward northern Paris, a frame structure 26 m long, 14 m wide and 11 m high was dug under the Saint-Ouen Station of RER C. The frame structure intercepts three barrettes which support the central platform of RER C. One barrette was cut and its forces transferred to the frame structure. Artificial ground freezing was used to allow earthworks in a complex geotechnical and hydrological environment. The article outlines the main features of the project. The thermal and mechanical design of ground freezing and the way in which it was implemented on site overcame the difficulties. □

#### LÍNEA 14: CONGELACIÓN PARA EL PASO BAJO LA ESTACIÓN DEL RER C DE SAINT-OUEN

LOUIS DELMAS, SYSTRA - LAURENT BUISSART, SPIE BATIGNOLLES - CHRISTIAN GILBERT, SYSTRA - GIORGIO FANTAUZZI, SYSTRA

En el marco de la prolongación de la Línea 14 del metro hacia el norte de París, se ha realizado una obra marco de 26 m de longitud, 14 m de ancho y 11 m de altura bajo la estación de la línea de cercanías (RER) C en Saint-Ouen. La obra marco intercepta tres vigas que soportan el andén central del RER C. Se ha cortado una viga y sus esfuerzos se han transmitido a la obra marco. Se ha utilizado la técnica de congelación artificial de los suelos para permitir el asiento en un contexto geotécnico e hidrológico complejo. El artículo presenta las grandes líneas del proyecto. El diseño térmico y mecánico de la congelación del suelo y la forma en que se ha aplicado in-situ han superado las dificultades. □