

TUNNELS & ESPACE SOUTERRAIN

DOSSIER

CREUSEMENT À L'EXPLOSIF

spie batignolles

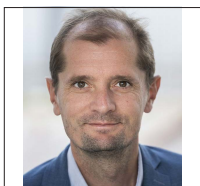
/ génie civil

ASSOCIATION FRANÇAISE
DES TUNNELS ET
DE L'ESPACE SOUTERRAIN



Ligne 14 lot T03

Une congélation de sol de haute technicité



Laurent Buissart,
Directeur de projet,
Spie Batignolles génie civil,



Philippe Moyal,
Directeur de projet
délégué, RATP,



Louis Delmas,
Ingénieur géotechnicien,
Systra,



Andréa Rigazio,
Directeur France, Icop

1. Préambule

Le projet de prolongation de la ligne 14 du métro Parisien au nord, jusqu'à la Mairie de Saint Ouen est situé dans une zone hydrogéologique complexe. Il se caractérise par le franchissement d'ouvrages existants sensibles dont celui du RER C au niveau de la station « Clichy Saint Ouen », à 500 m de la Seine. Ce point singulier consiste à réaliser un ouvrage cadre juste sous le RER C, dans des formations hétérogènes et saturées en eau, par la technique de la congélation des sols. C'est par une congélation mixte « azote/ saumure » que le défi a pu être relevé par les équipes de Spie Batignolles et de Vinci construction. Ce succès se caractérise par un trafic du RER C qui n'a subi aucun arrêt d'exploitation pendant les 18 mois de congélation.

Cet article a pour objet de présenter le projet du lot T03 et de faire un focus sur la congélation.

Enfin, il sera développé un rappel historique de la première expérience de congélation de sol menée en France, il s'agit de la traversée sous fluviale de la ligne 4 sous la Seine.

Principaux intervenants

Maitre d'ouvrage : Ratp / STIF

Maitrise d'œuvre : Systra

Entreprises : Spie Batignolles génie civil (mandataire), Spie Batignolles fondations, Botte fondations, Chantiers modernes constructions, Dodin Campenon Bernard

Bureau d'études « congélation » : DITS (Vinci Construction Grands Projets)

Sous-traitant « congélation » : ICOP SPA

2. Présentation du projet « Prolongation Ligne 14 nord »



Le chantier du prolongement de la ligne 14 du métro parisien au nord consiste à construire 5.8 km de tunnel et 4 stations associées. L'allotissement des marchés de gros œuvre a été fait en 3 lots :

- Lot 1 : section allant de Saint Lazare jusqu'à Clichy Saint Ouen, 3.6 km de tunnel et 2 stations associées (Pont Cardinet et Porte de Clichy).
- Lot 2 : section entre Mairie de saint Ouen et Clichy saint Ouen, 2.2 km de tunnel (y compris raccordement au SMR), avec une station associée- Mairie de Saint-Ouen et 3 puits (Glarner, Cachin et Pierre).
- Lot 3 : la station Clichy-Saint-Ouen.

Projet ligne 14 nord - Line 14 North Project

Line 14 Lot T03

Ground freezing of high technicality

Laurent Buissart,

Project Director, Spie
Batignolles Génie
Civil,

Sebastien Guinet,

Works Director,
Chantiers Modernes
Constructions, (Vinci
Construction subsi-
diary)

Philippe Moyal,

Deputy Project Direc-
tor, RATP,

Louis Delmas,

Geotechnical En-
gineer, Systra,

Andréa Rigazio,

Director France, Icop

1. Foreword

The project to extend line 14 of the Parisian metro station to the north, as far as the Saint Ouen town hall, is located in a complex hydrogeological zone. It is characterised by the crossing of existing sensitive structures including RER C at the station “Clichy Saint Ouen”, 500m from the Seine. This singular point consists of creating a framework structure just under the RER C, in heterogeneous formations saturated with water, through the technique of ground freezing. It is through a mixed freezing of “nitrogen and brine” that the challenge was taken up by the teams of Spie Batignolles and Vinci Construction. This success is demonstrated by RER C traffic that was not shut down during the 18 months of freezing.

This article aims to present the project of lot T03 and to focus on freezing.

Finally, a historical reminder of the first ground freezing experiment conducted in France will be set out, regarding the under-river crossing of line 4 under the Seine.

Main speakers

Project Owner: Ratp/STIF

Project Manager: Systra

Companies: Spie Batignolles civil engineering (Lead Partner), Spie Batignolles fondations, Botte fondations, Chantiers modernes constructions, Dodin Campenon Bernard

“Freezing” design office: DITS (Vinci Construction Grands Projets)

“Freezing” subcontractor: ICOP SPA

2. Presentation of the project “Extension of Line 14 North”

Recent ground freezing projects (non-exhaustive list):

The latest freezing projects carried out in France are as follows:

Paris, A86 - Socatop (security shelters - 2006- VCGP- Spie fondations),

Vaujours (Intrafor/Cofor access shaft - 1985),

Lyon, BPLN (Lyon, connection branch - GTM/Bouygues - 1996),

Paris, line 14 station Porte de Clichy, linkage branch with the TGI (2016, ICOP/ Eiffage foundations)

Paris, line 12 (tunnel junction/diaphragm walls of station/Vinci construction, 2017)

Paris, line 16, test plot at Aulnay Sous-bois (2017, Soletanche Bachy).

And in Europe:

Italy, Rome metro, line C Sant Giovanni station (Trevi Company -2016)

Italy, Naples Metro, Line 6, Municipio Station (Trevi Company - 2017)

Italy, Naples metro line 6, 2 branches (2018, Maltauro Company)

Italy, Brenner Base Tunnel (in progress, 4 freezing tunnels 35 m long - Salini-Strabag)

Egypt, under the Suez Canal, tunnel bypass (Bauer/Deilmann Haniel company)

Warsaw (Poland), Line 2 station Centrum Nauki Kopernik, Rodio Spezialtiefbau GmbH Company.

The project to extend line 14 of the Paris Metro to the north consists of building 5.8 km of tunnel and 4 associated stations. The allocation of structural works contracts was done in 3 lots:

- Lot 1: section from Saint Lazare to Clichy Saint Ouen, 3.6 km of tunnel and 2 associated stations (Pont Cardinet and Porte de Clichy).
- Lot 2: section between Mairie de Saint Ouen and Clichy Saint Ouen, 2.2 km of tunnel (including connection to the SMR), with an associated station- Mairie de Saint-Ouen and 3 shafts (Glarner, Cachin and Pierre).
- Lot 3: the Clichy-Saint-Ouen station.

Derniers projets de congélation de sol (liste non exhaustive):

Les derniers projets de congélation réalisés en France sont les suivants :

Paris, A86 - Socatop (niches de sécurité- 2006-VCGP- Spie fondations),

Vaujours (Intrafor/ Cofor puits d'accès - 1985),

Lyon, BPLN (Lyon, rameau de connexion- GTM/ Bouygues - 1996),

Paris, ligne 14 station porte de Clichy, rameau de liaison avec le TGI (2016, entreprises ICOP/ Eiffage fondations)

Paris, ligne 12 (jonction tunnel/ parois moulées de station/ Vinci construction, 2017)

Paris, ligne 16, plot d'essai à Aulnay Sous-bois (2017, Soletanche Bachy).

Et en Europe :

Italie, métro de Rome, ligne C station Sant Giovanni (Entreprise Trevi-2016)

Italie, métro de Naples, Ligne 6, Station Municipio (Entreprise Trevi – 2017)

Italie, métro de Naples, ligne 6, 2 rameaux (2018, entreprise Maltauro)

Italie, Tunnel de base du Brenner (en cours, 4 tunnels à congeler de 35 m de longueur- Salini- Strabag)

Egypte, sous le canal de Suez, tunnel by pass (entreprise Bauer/ Deilmann Haniel)

Varsovie (Pologne), Ligne 2 station Centrum Nauki Kopernik, entreprise Rodio Spezialtiefbau GmbH.

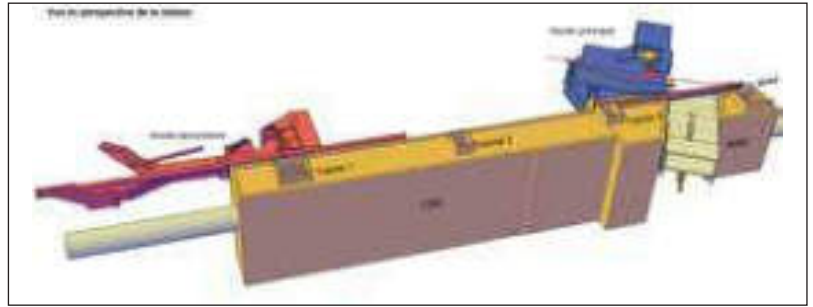


Figure 1 : Vue 3D de la station Clichy-Saint-Ouen - 3D view of the Clichy-Saint-Ouen station

Quantités principales

Montant du marché de base : 60 074 326,17 € HT

Période des travaux : de décembre 2014 à novembre 2019

Paroi moulée : 25 000m³

Béton de structure : 30 000 m³

Armatures : 6 000 t

Paroi au coulis : 7 500 m²

Jet Grouting : 950 colonnes soit 11800 ml de forage et 4700 ml « jetés »

Forages de congélation : 145 forages/ 1900 ml en cumulé

Soutènement du tunnel : 300t en HEM 220

Main quantities

Base contract amount: 60,074,326.17 euros excl. VAT

Period of works: from December 2014 to November 2019

Diaphragm wall: 25,000m³

Concrete structure: 30,000 m³

Reinforcement: 6,000 t

Grout wall: 7,500 m²

Jet Grouting: 950 columns or 11800 lm of drilling and 4700 lm "cast"

Freezing drilling: 145 boreholes/1900 lm cumulative

Retaining the tunnel: 300t in HEM 220

3. Présentation du lot T03

Le lot T03 consiste à créer la station Clichy Saint-Ouen, interconnectée avec la gare du RER C « Saint-Ouen ».

Ce lot est initialement attaché au lot T02. Il a finalement été séparé pour des raisons techniques, à savoir :

- Des déviations lourdes de réseaux en surface (Gaz, CPCU, eau, assainissement, électricité, fibres optiques, etc.),
- Un passage sous le RER C qui présentait une méthode de pré-soutènement et d'étanchéité unique : la congélation de sol.

La station Clichy Saint-Ouen se compose des 6 ouvrages suivants :

- Le corps de station (CSO), aux dimensions suivantes 140m x 15 m x 20 m de profondeur,
- La baie d'aération mécanisée (BAM), 20mx20m x20m,
- L'accès principal (ACP),
- L'accès secondaire (ACS),
- L'accès Sanzillon (ACZ),
- L'ouvrage cadre sous le RER C (OC) qui est un tunnel de 26 ml de long, avec comme gabarit libre intérieur 9 m x 4 m.

En phase travaux, CSO sert de puits de sortie du tunnelier du lot T1, et la BAM de puits de sortie du lot T2.

Il est à noter que l'accès principal, à l'est, permet l'interconnexion avec le RER C et que l'accès secondaire, à l'ouest permet le raccordement avec la ville de Clichy et donc le département des Hauts de seine (92).

3.1. Contexte hydrogéologique

Les horizons rencontrés sont :

- Les alluvions modernes et anciennes,
- Les marno-calcaires de Saint-Ouen (MCSO) dont les calcaires de Ducy (CDU) à leur base,
- Les sables de Beauchamp (SB) et les marnes et caillasses (MC), avec un pendage NO->SE de l'ordre de 5% dans la zone traversée.

Le massif est baigné par 2 nappes : la nappe lutétienne alimentée par les MC et la nappe bartonienne par les MCSO. Ces deux nappes sont séparées par le sable de Beauchamp médian, plutôt argileux et qui présente une perméabilité de 10⁻⁶ m/s.

3.2. Description de l'ouvrage cadre sous le RER C et fondations du RER C existantes

L'ouvrage cadre « Ligne 14 » sous le RER C se trouve dans le gabarit des fondations du RER C. Construite en 1987, la gare de Saint-Ouen est fondée sur des barrettes, parois moulées et parois berlinoises. C'est à cause de ces fondations que le tunnelier du lot 2 n'a pu percer dans CSO. Le tunnel de jonction entre CSO et BAM doit donc être réalisé en creusement « traditionnel ».

3. Presentation of lot T03

Lot T03 consists of creating the station Clichy Saint-Ouen, interconnected with the RER C station "Saint-Ouen".

This lot was initially attached to lot T02. It was finally separated for technical reasons, namely:

- Heavy deviations of surface networks (gas, CPCU, water, sanitation, electricity, fibre optics, etc.),
- A passage under RER C which presented a unique pre-retaining and sealing method: ground freezing.

The station Clichy Saint-Ouen consists of the following 6 structures:

- The station body (CSO), with dimensions 140m x 15m x 20m deep,
- The mechanised ventilation bay (BAM), 20m x 20m x 20m,
- Principal Access (ACP),
- Secondary Access (ACS),
- Sanzillon Access (ACZ),
- The framework structure under RER C (OC) which is a tunnel 26 lm long, with as free internal clearance of 9m x 4m.

During the construction phase, CSO serves as the exit shaft for the T1 lot TBM, and the BAM for the T2 lot exit shafts.

It should be noted that the principal access, to the east, allows interconnection with the RER C and that the secondary access to the west allows for a connection with the town of Clichy and therefore the department of Hauts de Seine (92).

3.1. Hydrogeological context

The horizons encountered are:

- Modern and ancient alluvial deposits,
- The marly limestone of Saint-Ouen (MCSO) including the Ducy limestones (CDU) at their base,
- The sands of Beauchamp (SB) and marls and pebbles (MC), with a NW -> SE dip of about 5% in the area crossed.

The rock mass is covered by two water tables: the Lutetian water table fed by the MC and the Bartonian water table by the MCSO. These two water tables are separated by the medium Beauchamp sand, rather clayey and which has a permeability of 10^{-6} m/s.

3.2. Description of the framework structure under RER C and existing RER foundations

The framework structure "Line 14" under RER C is found in the clearance of the RER C foundations. Built in 1987, the Saint-Ouen station is based on bars, diaphragm walls and Berlin walls. It is because of these foundations that the TBM of lot 2 could not break through the CSO. The junction tunnel between CSO and BAM must therefore be done in "traditional" excavation.

The dimensions of the framework structure under RER C are 26m x 13m x 8m.

Of the 3 bars encountered during the excavation, only bar B3 is preserved, bar B12 is trimmed to be included in the side wall of the future civil engineering of the structure and bar B11 is cut. A load transfer is carried out between bar B11 and the framework structure by assembly (hyperstatic connection), via a support beam.

The excavated earths are mainly the Beauchamp sands and the marly limestone of Saint-Ouen in vault, under 15 metres of water, from where the need to freeze the surrounding ground arose. The expected water flows in case of water inflow could be considerable and cause a total flooding of line 14, up to Olympiades, which is why the project is classified as having a high technical risk.

It should be noted that the marly limestone of Saint-Ouen was previously injected with a cement bentonite slurry at 2 bar, with grouting lances.

On the sands of Beauchamp, injectability tests with cement bentonite slurry, then microcement were carried out in the experimental phase in 2013 but poor residual permeability results led to the solution of ground freezing. A treatment of the Beauchamp sands by horizontal jet grouting had also been approached in the pre-project studies phase, but the approximate result of this method, in the face of the induced risk, finally eliminated this solution.

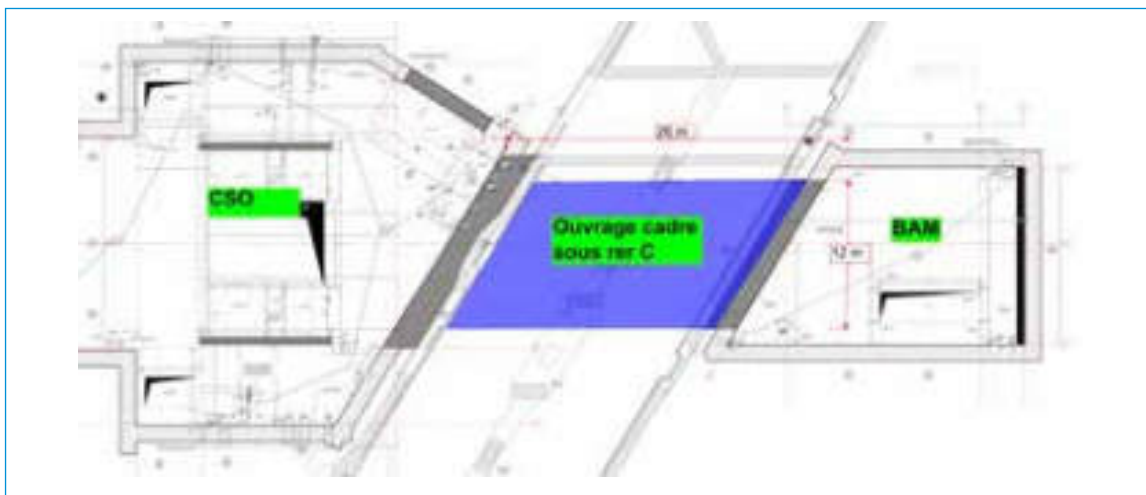


Figure 2 : Vue en plan de l'ouvrage cadre sous le RER C - Plan view of the framework structure under RER C



Figure 3 - 4 : Vue panoramique du tunnel excavé sous le RER C, avec la barrette B11 au centre - *Panoramic view of the tunnel excavated under RER C, with the B11 bar in the centre*

Les dimensions de l'ouvrage cadre sous RER C sont 26 m x 13 m x 8 m.

Des 3 barrettes rencontrées lors de l'excavation, seule la barrette B3 est conservée, la barrette B12 est rognée pour être incluse dans le piédroit du futur génie civil de l'ouvrage et la barrette B11 est coupée. Un transfert de charge est effectué entre la barrette B11 et l'ouvrage cadre par moisage (liaison hyperstatique), via une poutre de reprise.

Les terrains excavés sont principalement les sables de Beauchamp et les marno-calcaires de Saint-Ouen en voûte, sous 15 mètres d'eau, d'où la nécessité de congeler le terrain autour. Les débits d'eau attendus en cas de venues d'eau pourraient être considérables et entraîner une inondation totale de la ligne 14, jusqu'à Olympiades, c'est pour cela que le projet est classé à haut risque technique.

Il est à noter que les marno-calcaires de Saint-Ouen ont préalablement été injectés par un coulis de bentonite ciment à 2 bars, sous tubes à manchettes.

A propos des sables de Beauchamp, des essais d'injectabilité au coulis de bentonite ciment, puis microciment ont été réalisés en phase expérimentale en 2013 mais les résultats de perméabilité résiduelle médiocres ont amenés à une solution par congélation de sol. Un traitement des sables de Beauchamp par jet grouting horizontal avait aussi été abordé en phase AVP mais le résultat approximatif de cette méthode, face au risque induit a finalement écarté cette solution.

4. Les travaux souterrains

La section du tunnel sous RER C à creuser est de 12 m x 8 m fini, avec un biais de 30° par rapport à son axe.

Le tunnel est creusé en 6 sections différentes : 3 en haut et 3 en bas. Les galeries du bas, ainsi que leur génie civil sont d'abord réalisées afin d'assurer la stabilité à la poussée d'Archimède.

Les galeries du haut sont faites dans un second temps, puis leur GC et en particulier la liaison entre l'ouvrage cadre et le RER C (réalisation d'une poutre en sous œuvre et reprise des efforts par vérinage).

Le soutènement mis en place est fait de cadre en HEM 220, et 30 cm de béton projeté fibré. Un soin tout particulier est fait au niveau des assemblages boulonnés car les cintres des galeries supérieures se raccordent aux cintres du bas.

Le début du creusement s'est fait le 17 septembre 2018, pour se finir le 9 mars 2019. Ces travaux ont été exécutés en 3x8h, et 7j/7 afin de garantir une continuité des travaux mais aussi une surveillance de l'ouvrage.

Les principaux matériels spécifiques utilisés ont été les suivants :

- 2 pelles tunnels (Wimmer blue badger et hitachi PC 135) équipées de toute la panoplie spécifique aux travaux souterrains (BRH, fraise et pinces à cintres) + 1 pelle wimmer blue badger en spare,
- 2 pelles brokk 330 et 500 pour les zones les plus exigües,
- 4 robots béton projeté, 2 trémies à déblais, 4 chargeurs.

L'expertise des services matériel des entreprises du groupement, en particulier Sotrabas a été mise à profit du projet afin d'avoir le matériel le plus adapté aux contraintes de site (exiguïté, humidité etc).



Figure 5 : Réalisation d'une auréole de boulons forepoling au mini pantofore - *Construction of a forepoling bolts halo with mini pantofore*



Figure 6 : Une des équipes de creusement traditionnel lors du baptême du matériel - *One of the traditional excavation teams at the baptism of the equipment*

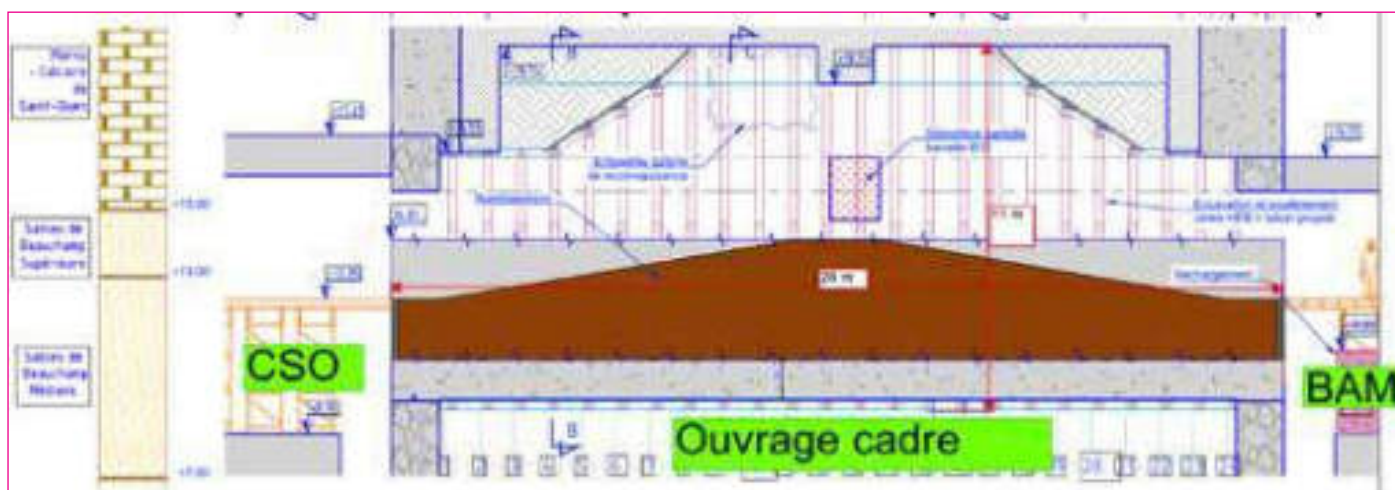


Figure 7 : Coupe longitudinale de l'ouvrage cadre sous RER C - *Longitudinal section of the framework structure under RER C*

4. Underground works

The section of tunnel under RER C to excavate is 12m x 8m finished, with a bias of 30° to its shaft.

The tunnel is excavated in 6 different sections: 3 at the top and 3 at the bottom. The tunnels below, as well as their civil engineering are first carried out to ensure stability through Archimedes buoyancy.

The upper tunnels are done in a second stage, then their civil engineering works and in particular the connection between the framework structure and the RER C (construction of a beam under construction and support effort through jacking).

The support put in place is made of framework in HEM 220, and 30cm of fibre-reinforced shotcrete. Particular care is taken in the bolted joints because the arches of the upper tunnels are connected to the lower arches.

The excavation start was on September 17th, 2018, to end on March 9th, 2019. This work was done in 3 x 8 hour shifts, and 7 days a week, to ensure continuity of the works but also a monitoring of the structure.

The main specific materials used were:

- 2 tunnel excavators (Wimmer Blue Badger and Hitachi PC 135) equipped with all the equipment specific to underground work (pneumatic drill, cutter and arch grippers) + 1 Wimmer Blue Badger excavator as spare,
- 2 Brokk 330 and 500 excavators for the smallest areas,
- 4 shotcrete robots, 2 cuttings hoppers, 4 crawlers.

The expertise of the equipment departments of the pool's companies, in particular Sotrabas, was put to use for the project in order to have the equipment best suited to the constraints of the site (small size, humidity etc.).

5. Ground freezing works

5.1. Principle:

The principle of ground freezing is to transform the interstitial water (free water) from the ground into ice (solid phase), thus ensuring a tight and resistant connection between the grains of the ground. The mechanical characteristics of the ground improve because the ice plays the role of binder, decreasing at the same time the permeability of the ground.



Figure 8 : Début du creusement de la galerie G1, côté BAM - *Start of the excavation of the G1 gallery, BAM side*



Figure 9 : Etat de la paroi moulée avant creusement - *State of the diaphragm wall before excavation*

5. Les travaux de congélation de sol

5.1. Le principe :

Le principe de la congélation des sols est de transformer l'eau interstitielle (eau libre) du sol en glace (phase solide), assurant ainsi une liaison étanche et résistante entre les grains du terrain. Les caractéristiques mécaniques du terrain augmentent car la glace joue le rôle de liant, diminuant par la même occasion la perméabilité du terrain.

La congélation d'un sol provient du transfert de frigories d'un fluide à basse température vers le terrain par l'intermédiaire d'une sonde : l'eau en contact avec la sonde se transforme en glace formant une colonne de terrain congelé, s'épaississant avec le temps, ce qui permet de réaliser des murs étanches et résistants. Ainsi, le comportement du sol est amélioré depuis la période de mise en froid, pendant le maintien du froid et ce jusqu'au dégel.

La solidification de l'eau interstitielle dans le terrain donne au sol congelé une cohésion importante. En effet, lors de la congélation, les contraintes appliquées dans le terrain se répartissent à la fois sur le squelette du sol et sur la glace formée lors de la mise en froid. L'angle de frottement interne pour un sol congelé est généralement considéré comme égal ou légèrement inférieur à celui du sol non congelé.

De la même façon que la glace voit sa résistance augmenter à mesure que la température baisse, la résistance d'un terrain congelé dépend de la température à laquelle il se trouve. A titre d'exemple, une argile silteuse à -18°C présente une résistance en compression plus de 4 fois supérieure au même matériau soumis à une température de -5°C , alors que la glace verra sa résistance en compression augmenter d'environ 35% seulement. Le graphique figure 12 synthétise les résultats des travaux de l'USAF (1960), de Wolfe & Thieme (1963) et Sayles (1965).

La glace et donc les sols gelés sont des matériaux qui fluent très rapidement. Lors des premières 24h sous charge, la résistance diminue fortement.

Ces phénomènes ont été pris en compte dans l'établissement du modèle mécanique qui a permis de justifier la compatibilité des efforts apportés à la coque avec la résistance des Sables de Beauchamp congelés.

Le procédé utilisé sur la ligne 14 lot T03 est une congélation mixte, à savoir :

- Une congélation primaire à l'azote liquide (mise en froid) pour figer rapidement l'eau des terrains,
- Un entretien de la congélation à la saumure, pendant toute la durée du creusement du tunnel sous RER C.

La congélation à l'azote liquide permet de « fixer » l'eau dans les sols en cas de circulation dans l'aquifère et de gagner du temps pendant la mise en froid. La saumure permet un entretien « économique » de la coque congelée à des températures plus élevées.

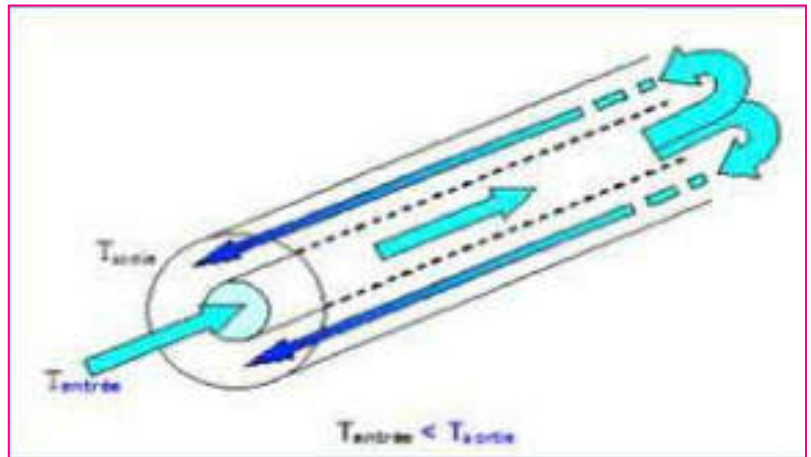


Figure 10 : Schéma de circulation type dans une sonde de congélation - *Typical flow diagram in a freezing probe*

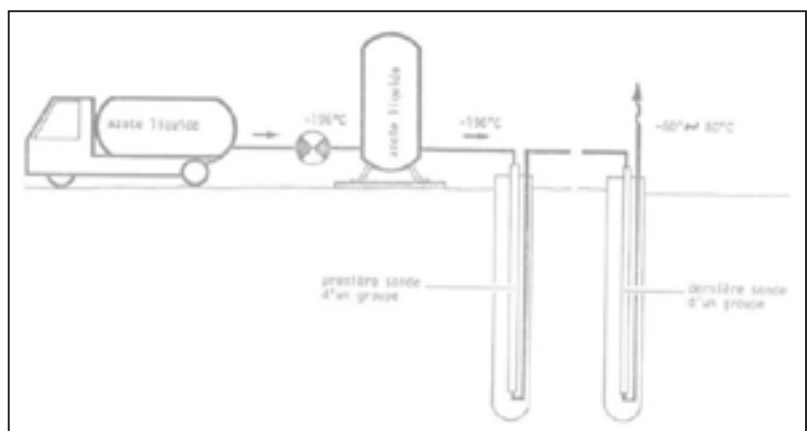


Figure 11 : Schéma de principe installation de congélation à l'azote

Les températures minimales obtenues sont -196°C pour l'azote liquide et -36°C pour la saumure.

Le process s'articule autour des 3 composantes principales suivantes :

- Le forage (précision/étanchéité),
- La mise en froid et son entretien (moyens matériels et humains),
- La partie « ingénierie » (pilotage, auscultation, R&D, impacts sur les existants, coupe Plaxis..., gestion des risques etc).

Le projet de base conçu par la maîtrise d'œuvre prévoit un traitement par injection de coulis de ciment des marno-calcaires de Saint-Ouen, et des marnes et caillasses ainsi qu'une congélation de sol des sables de Beauchamp, par deux voiles congelés.

Le risque principal induit par la congélation est un soulèvement du RER C situé au-dessus. Le gonflement cryogénique est dû au changement d'état de l'eau dans la matrice granulaire. D'une part, l'eau interstitielle voit son volume augmenter de l'ordre de 10% lors du changement d'état.

The freezing of ground comes from the transfer of frigories from a fluid at low temperature to the ground via a probe: the water in contact with the probe is transformed into ice forming a column of frozen ground, thickening over time, which allows for waterproof and resistant walls. Thus, the behaviour of the ground is improved from the cold period, over the maintenance of the cold and until thaw.

The solidification of the interstitial water in the ground gives the frozen ground significant cohesion. Indeed, during freezing, the stresses applied in the ground are distributed both over the skeleton of the ground and over the ice formed during the cold setting. The internal friction angle for frozen ground is generally considered to be equal to or slightly lower than that of unfrozen ground.

In the same way that the ice increases in resistance as the temperature drops, the resistance of frozen ground depends on the temperature at which it is situated. By way of example, a silty clay at -18°C has a compressive strength more than 4 times greater than the same material subjected to a temperature of -5°C , whereas ice will have a compressive strength increase of about only 35%. The following figure 12 summarises the results of the USAF (1960), Wolfe & Thieme (1963) and Sayles (1965).

Ice and therefore frozen ground are materials that flow very quickly. During the first 24 hours under load, the resistance decreases sharply.

These phenomena were taken into account in the establishment of the mechanical model that justified the compatibility of the forces on the shell with the resistance of the frozen Beauchamp Sands.

The process used on line 14 lot T03 is mixed freezing, namely:

- A primary freezing with liquid nitrogen (cold setting) to rapidly freeze water from the ground,
- Maintenance of freezing with brine, throughout the entire tunnel excavation under RER C.

Liquid nitrogen freezing is used to “set” the water in the ground in the event of circulation in the aquifer and to save time during cold setting. Brine allows “economical” maintenance of the frozen shell at higher temperatures.

The minimum temperatures obtained are -196°C for liquid nitrogen and -36°C for brine.

The process is organised around the following 3 main components:

- Drilling (precision/watertightness),
- Cold setting and its maintenance (material and human resources),
- The “engineering” part (supervision, surveys, R&D, impacts on existing structures, Plaxis cutting..., risk management, etc.).

The basic project designed by the project management involves a cement slurry injection of the marly limestone of Saint-Ouen, and the marls and stones as well as a ground freezing of the Beauchamp sands, by two frozen runouts.

The main risk from freezing is a heave of the RER C above. The cryogenic swelling is due to the change of state of the water in the granular matrix. On the one hand, the interstitial water volume increases by about 10% during the change of state.

This increase in volume can be absorbed by the ground in several ways. On the one hand, if permeability allows it, by the evacuation of the surrounding liquid water by piston effect, on the other hand, if permeability does not allow it, by mobilising the stiffness of the granular matrix. In case of low permeability and rigid terrain, a granular reorganisation takes place, leading to an increase in volume. This increase is, however, limited to the fringe undergoing a change of state, there is no increase in volume when the change of state is completed. Another phenomenon, cryogenic suction, can lead to continuous increases over time. This phenomenon concerns medium to low permeability grounds, such as silts. At the microscopic level, free water freezes at the melting temperature of water. Bound water, on the other hand, freezes at lower temperatures due to intermolecular energy near the grains. It remains liquid, but at temperatures below its melting temperature, so in an unstable state. The melting temperature of a liquid is related to the pressure. So to compensate for this unstable state, the bound water is in depression and creates suction. The surrounding water in the non-frozen portion is drawn to the frost line. This cryogenic suction thus creates linear increases in volume over time. This phenomenon is however less pronounced at depth due to the surrounding pressure making it possible to compensate for the instability of the free water.

The “U” shape of the frozen shell also induces a problem of buoyancy under Archimedes’ pressure, during the excavation. The ballasting of the structure was required and constituted a real difficulty in the construction phasing (division of the excavation).

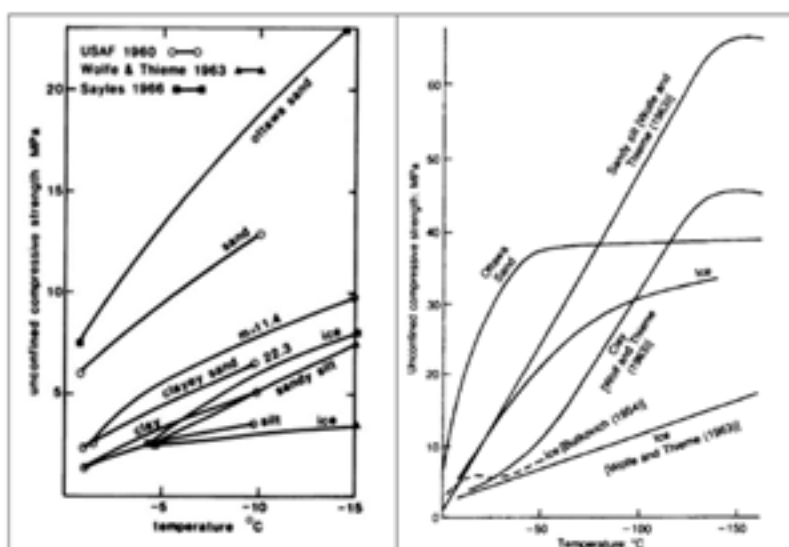


Figure 12 : UCS de quelques échantillons (sables, argiles, glace)

Cette augmentation de volume peut être absorbée par le terrain de plusieurs façons. D'une part, si la perméabilité le permet, par l'évacuation de l'eau liquide environnante par effet piston, d'autre part, si la perméabilité ne le permet pas, en mobilisant la raideur de la matrice granulaire. En cas de perméabilité faible et de terrain de forte raideur, une réorganisation granulaire a lieu, menant à une augmentation de volume. Cette augmentation est cependant limitée à la frange en cours de changement d'état, il n'y a plus d'augmentation de volume lorsque le changement d'état est terminé. Un autre phénomène, la succion cryogénique, peut mener à des augmentations continues dans le temps. Ce phénomène concerne les terrains de perméabilité moyenne à faible, tels que les limons. Au niveau microscopique, l'eau libre gèle à la température de fusion de l'eau. L'eau liée, quant à elle, gèle à des températures plus faibles du fait de l'énergie intermoléculaires à proximité des grains. Elle reste donc liquide, mais à des températures inférieures à sa température de fusion, donc dans un état instable. La température de fusion d'un liquide est liée à la pression. Ainsi pour compenser cet état instable, l'eau liée est en dépression et crée de la succion. L'eau environnante située dans la partie non-gelée est attirée vers le front de gel. Cette succion cryogénique crée donc des augmentations linéaires du volume dans le temps. Ce phénomène est cependant moins prononcé en profondeur car la pression environnante permet de compenser l'instabilité de l'eau libre.

La forme en « U » de la coque congelée a également induit une problématique de flottaison sous la poussée d'Archimède, lors de l'excavation. Le lestage de l'ouvrage a été nécessaire et a constitué une réelle difficulté dans le phasage de réalisation (découpage du creusement).

5.2. Les forages

La partie « forages de congélation » est une étape cruciale au bon fonctionnement de la coque congelée. Les points « avant », côté « paroi moulée » sont connus précisément et la cible à atteindre est une cible de 40 cm de diamètre à 13 m de longueur, c'est-à-dire que la tolérance d'exécution est de 1.5 %.

Les forages ont été réalisés à l'aide d'une foreuse développée par les équipes du groupement, et les barres de forages utilisées ont les caractéristiques suivantes : longueur de 1 ml, diamètre intérieur de 89 mm, épaisseur de 8 mm. Un soin particulier est donné sur la qualité des filetages des tubes et sur les épaulements usinés.

Pour se prémunir d'éventuelles venues d'eau pendant la foration, le groupement a fait usage de :

- Tricônes équipés de clapet anti-retour spécifiques,
- Une cheminée d'équilibrage,
- De porte sas scellés dans la paroi moulée,
- Un dispositif de sas à étages (vannes guillotines et dosapro), type « B.O.P », sans dispositif de sectionnement de barre de forage.

Malgré les dispositions prises, les forations sous environ 2 bars de pression de la nappe ont constitué une étape à risque pour le projet (risque de débouillage du sable de Beauchamp).

Des essais de trajectométrie, par utilisation de visée optique (théodolite et maxibor), puis de mesures gyroscopiques ont permis de déceler d'éventuelles fenêtres dans la coque qui ont ensuite nécessité des fermetures par l'exécution de forages complémentaires, du côté du front où se situe la fenêtre, ou alors depuis le front symétrique.

Au total 139 forages, 60 coté CSO, 56 coté BAM, et 23 forages d'auscultation ont été exécutés entre juin et novembre 2017.



Vue d'ensemble atelier de forage de congélation - *Overview of freezing drilling work area*

6. L'auscultation

L'auscultation particulière à la congélation de sol mise en place est la suivante :

- 2 théodolites robotisés avec 90 cibles en gare du RER C,
- 1 théodolite en surface avec 250 cibles sur le bâti,
- 1 capteur de vibration en gare,
- 23 sondes de 7 thermocouples soit 161 thermocouples,
- 116 capteurs de température installés sur les têtes de congélation afin de connaître les températures de retour dans chaque tube,
- 10 piézomètres automatisés.

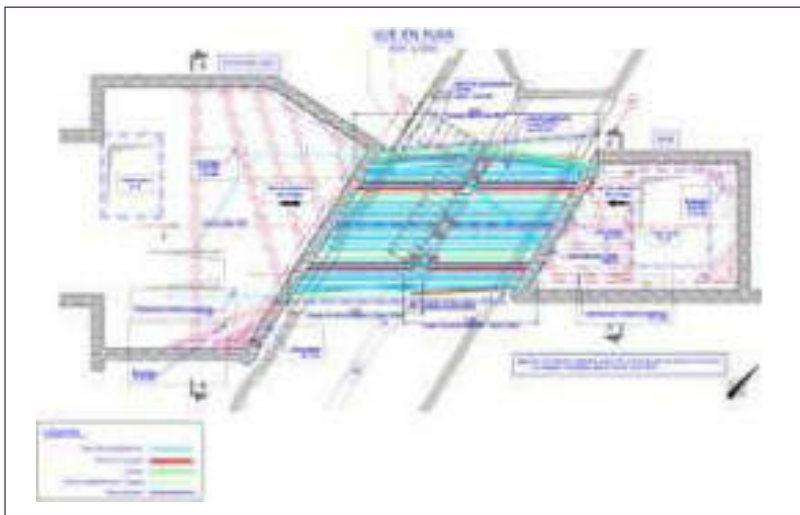


Figure 13 : Vue en plan de la congélation - Plan view of freezing

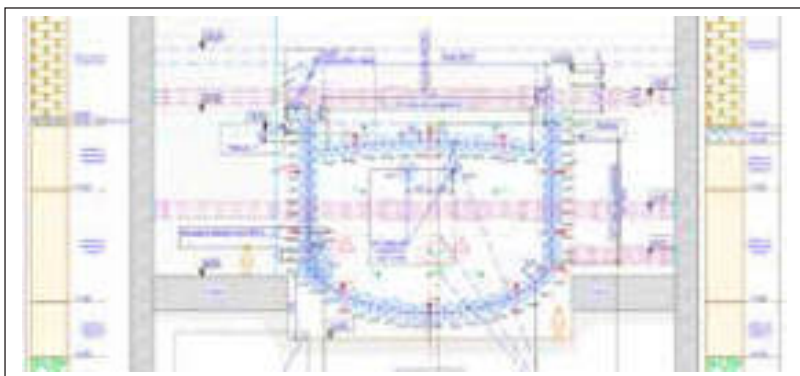


Figure 14 : Plan de tir de la congélation, côté CSO - View of freezing, CSO side

5.2. Drilling

The “freezing drilling” part is a crucial step in the proper functioning of the frozen shell. The “front” points on the “diaphragm wall” side are precisely known and the target to be reached is a target 40 cm in diameter at 13 m in length, that is, the execution tolerance is 1.5%.

The drilling was carried out using a drill developed by the teams of the group, and the drill bars used have the following characteristics: length of 1 m, internal diameter of 89 mm, thickness of 8 mm. Special care is given to the quality of the threads of the tubes and the machined shoulders.

To prevent any water inflows during the drilling, the pool made use of:

- Tricones equipped with specific anti-return valve,
- A balancing chimney,
- A sealed door in the diaphragm wall,
- A multi-stage airlock (guillotine and dosapro valves), of type “BOP”, without drilling bar cut-off device.

In spite of the measures taken, the boring, under about 2 bars of pressure, of the groundwater constituted a risky step for the project (risk of clearing the Beauchamp sands).

Trajectory tests, using optical sighting (theodolite and maxibor), followed by gyroscopic measurements revealed possible windows in the shell, which then required closures by performing additional drilling, on the side of the front where there is the window, or from the symmetrical front.

A total of 139 boreholes, 60 CSO side, 56 BAM side, and 23 boreholes were completed between June and November 2017.



Figure 15 : Atelier de forage de congélation avec SAS en premier plan - Freezing drilling work area with air lock in the foreground

6. Surveys

The surveys specific to ground freezing are as follows:

- 2 robotic theodolites with 90 targets in the RER C station,
- 1 theodolite on the surface with 250 targets over the construction,
- 1 vibration sensor in the station,
- 23 probes with 7 thermocouples, i.e. 161 thermocouples,
- 116 temperature sensors installed on the freezing heads to display the return temperatures in each tube,
- 10 automated piezometers.

For the thermocouples, the objective is to measure the temperature of the ground at a distance from the axis of the freezing probes. The holes were therefore “azimuthed”, in the vertical part, and inclined, in the horizontal parts of the shell. Once the 3D recording was done, the distance of each thermocouple to the freezing probes made it possible to extrapolate the temperature in the shell using a logarithmic model of the distribution of temperatures in the ground (thermal response of ground - see point below).

A propos des thermocouples, l'objectif est de mesurer la température du sol à distance de l'axe des sondes congélatrices. Les forages ont donc été azimutés, dans la partie verticale, et inclinés, dans les parties horizontales de la coque. Une fois réalisé le récolement en 3D, la distance de chaque thermocouple aux sondes congélatrices a permis d'extrapoler la température dans la coque grâce à un modèle logarithmique de la distribution des températures dans le sol (réponse thermique d'un sol- cf point ci-dessous).

Ce faisant, nous avons cherché à connaître la réponse réelle des 3 faciès suivants:

- Le calcaire de Ducy en partie supérieure,
- Les sables de Beauchamp en partie « piédroit »,
- Les sables de Beauchamp en partie « contre-voute ».

Le stockage des données issues des mesures d'auscultation du projet de congélation se fait au moyen de bases de données. Les données sont ensuite traitées automatiquement (seuils d'alerte) et manuellement pour piloter la coque congelée et optimiser son efficacité.

Les entreprises qui sont intervenues sur le projet pour la partie « auscultations » sont notamment ITM sol, Soldata, Solexpert et Hydrophy (traçages hydrauliques).

6.1. Préalable à la congélation de sol

La reconnaissance des circulations des nappes phréatiques traversées par le projet a été une étape essentielle au projet de congélation. Les deux nappes bartonienne et lutétienne sont initialement séparées par les sables de Beauchamp médians.

Durant la phase « exécution », des circulations verticales ont été décelées, celles-ci se justifient par l'activité anthropique depuis plusieurs décennies : des pompages industriels anciens dans la nappe du lutétien, au niveau de la plaine de Saint-Denis mais aussi sur la commune de Saint-Ouen ; ainsi que la présence d'un bâti dense à proximité (RER C, bâtiments de bureaux et habitats).

Des potentielles dissolutions de gypse y découlant ont entraîné des effondrements locaux « métriques » ; ce phénomène a d'ailleurs été découvert en station.

La base des calcaires de Saint-Ouen, caractérisée par le calcaire de Ducy a été le lieu de circulations importantes, amplifiées par les activités de forage et l'effet barrage. En effet, la réalisation des parois moulées de CSO et de BAM a créé un barrage artificiel aux circulations souterraines naturelles, et a concentré les circulations entre les deux puits, sous le RER C.

Afin de cartographier les circulations locales, le groupement a procédé à un traçage des nappes par l'utilisation de traceurs (éosine, uranine, fluorescéine) injectés dans des drains ou des piézomètres. Les résultats de cette cartographie (vitesse ponctuelle maximale de 19 m/j) ont entraîné la réalisation d'un séquençage de la congélation ainsi qu'à un test de stabilité d'érosion thermique des piédroits congelés.

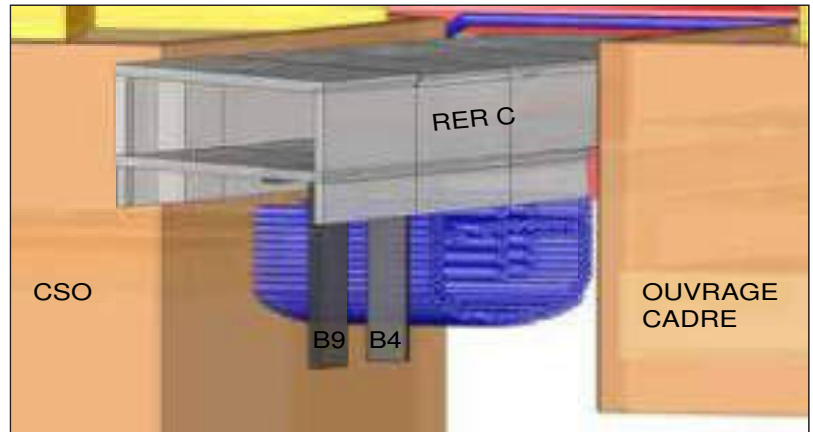


Figure 16 : Vue 3D de la coque congelée - 3D view of the frozen shell

Les objectifs principaux du séquençage de la congélation primaire sont donc de :

- Figurer les circulations d'eau au niveau du calcaire de Ducy de façon prioritaire,
- Puis vérifier la bonne tenue de la coque soumise aux circulations naturelles de la nappe.

A l'issue du séquençage puis du test d'érosion, qui a prouvé que la coque ne s'érodait pas, la congélation de la voûte parapluie a pu se faire dès le 16 avril 2018. Il est à noter que le test d'érosion a 2 objectifs :

- Vérifier que la coque congelée ne s'érode pas suite à des circulations d'eaux souterraines,
- Mais aussi vérifier que le terrain ne s'érode pas (augmentation de la perméabilité du sol suite à la constatation d'une augmentation de MES -Matières en suspension- dans les eaux issues des drains).



Figure 17 : Front côté CSO avec vue sur la congélation - Front on CSO side with view on the freezing

In doing so, we sought the true answer to the following 3 facies:

- The Ducey limestone at the top part,
- The sands of Beauchamp in the “side wall” part,
- The sands of Beauchamp in the “counter-vault”.

Storage of the data from the survey measurements of the freezing project is done by means of a database. The data is then processed automatically (alert thresholds) and manually to control the frozen shell and optimise its efficiency.

The companies involved in the project for the “surveys” part include ITM Sol, Soldata, Solexpert and Hydrophy (hydraulic tracings).

6.1. Prerequisites for ground freezing

The surveying of water table circulation crossed by the project was an essential step in the freezing project. The two Bartonian and Lutetian layers are initially separated by the median Beauchamp sands.

During the “execution” phase, vertical circulations were detected, which have been caused by human

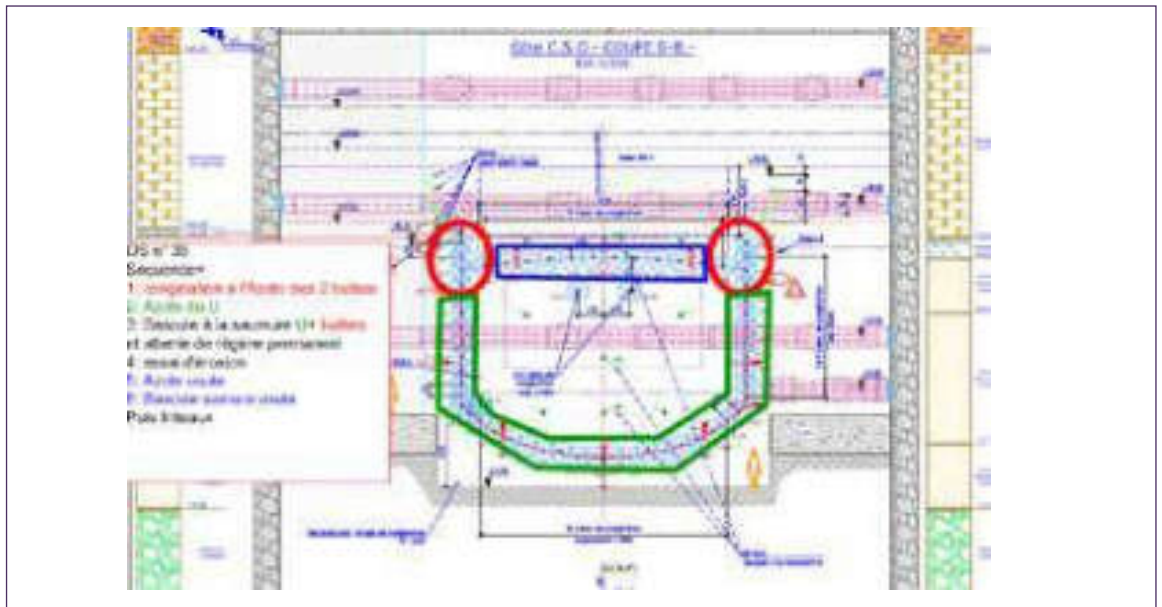
activity over several decades: old industrial pumping in the Lutetian water table, at the level of the Saint-Denis plain but also in the commune of Saint-Ouen; as well as the presence of a dense building area nearby (RER C, office buildings and residential).

Potential dissolutions of gypsum resulting from this led to local “metric” collapses; this phenomenon has also been discovered in the station.

The limestone base of Saint-Ouen, characterised by the Ducey limestone was the location of significant circulation, amplified by the drilling activities and the dam effect. Indeed, the construction of the CSO and BAM diaphragm walls created an artificial dam for the natural underground circulation, and concentrated the circulations between the two shafts, under RER C.

In order to map the local circulations, the pool proceeded to trace the layers by the use of markers (eosin, uranine, fluorescein) injected into drains or piezometers. The results of this mapping (maximum punctual velocity of 19m/d) led to the sequencing for the freezing as well as to a thermal erosion stability test of the frozen side walls.

Séquençage de la congélation - Sequencing of freezing



Plan de séquençage selon l'OS 35 - Sequencing plan as per OS 35

Dates effectives :

19 février 2018 : 1 (Azote sur haut piedroit)
 24 février 2018 : 2 (Azote sur U)
 26 Mars : 4 (Test érosion)
 16 avril : 5 (Voute congelée)
 25 avril : fin de la congélation
 26 juin : Arrêt de la voute
 Juillet/ août : études et OS
 17 Septembre : creusement
 11 décembre 2018 : fin creusement bas
 1 février 2019 : début creusement haut
 7 mars : fin creusement haut

Effective dates:

February 19, 2018: 1 (Nitrogen on upper sidewall)
 February 24, 2018: 2 (nitrogen on U)
 March 26: 4 (Erosion test)
 April 16: 5 (Frozen vault)
 April 25: end of freezing
 June 26: Stopping the vault
 July/August: studies and OS
 September 17: excavation
 December 11, 2018: end lower excavation
 February 1, 2019: start upper excavation
 March 7th: end upper excavation



Figure 18 : Cheminées d'évacuation d'azote - *Nitrogen evacuation chimneys*

La quantité d'azote liquide injectée lors de la première phase a été de 3500 m³, soit environ 1 m³ d'azote/m³ de terrain congelé.

Puis le maintien en froid s'est fait à l'aide d'un groupe froid à tour de refroidissement intégrée, d'une puissance de 450 kW.

Un silo d'azote a été conservé pendant toute la durée du chantier afin de pouvoir « re-basculer » à l'azote en cas de venue d'eau. Un groupe froid « saumure » de secours, de même capacité que le groupe initial, a été mis en place en cas de défaillance. Ce choix se justifiait du fait de l'absence de retour d'expérience sur des projets de congélation aussi longs (test à l'usure du matériel).

7. Soulèvements du RER C et adaptation de la congélation

Aucun seuil de soulèvement du RER C n'est prévu au marché. Dans un premier temps, les seuils de tassement ont été utilisés pour le soulèvement.

Le tassement admissible initial du RER C est de 5 mm ; il a dû être réévalué au soulèvement à 40 mm au fil du projet, suite notamment à une modélisation intégrale de la gare existante.

En effet, dès la première phase de congélation le 19/02/2018, des soulèvements du RER C ont été observés, montrant à la fois un phénomène de gonflement cryogénique important (dû aux effets de cryo-succion) mais aussi la présence de fondations existantes du RER C « travaillant » au contact de la congélation de sol.

Afin de limiter ces soulèvements, les actions suivantes ont été menées :

- Arrêt de congélation de la voûte, et adaptation du pré-soutènement (tôle de blindage) ;
- Réchauffement de la voûte congelée par une circulation de saumure à température ambiante ;
- Renforcement des auscultations dans le RER-C ;
- Augmentation de la température de consigne de saumure ;
- Études de faisabilité de congélation mixte « saumure/ saumure » ou « azote/ saumure ».

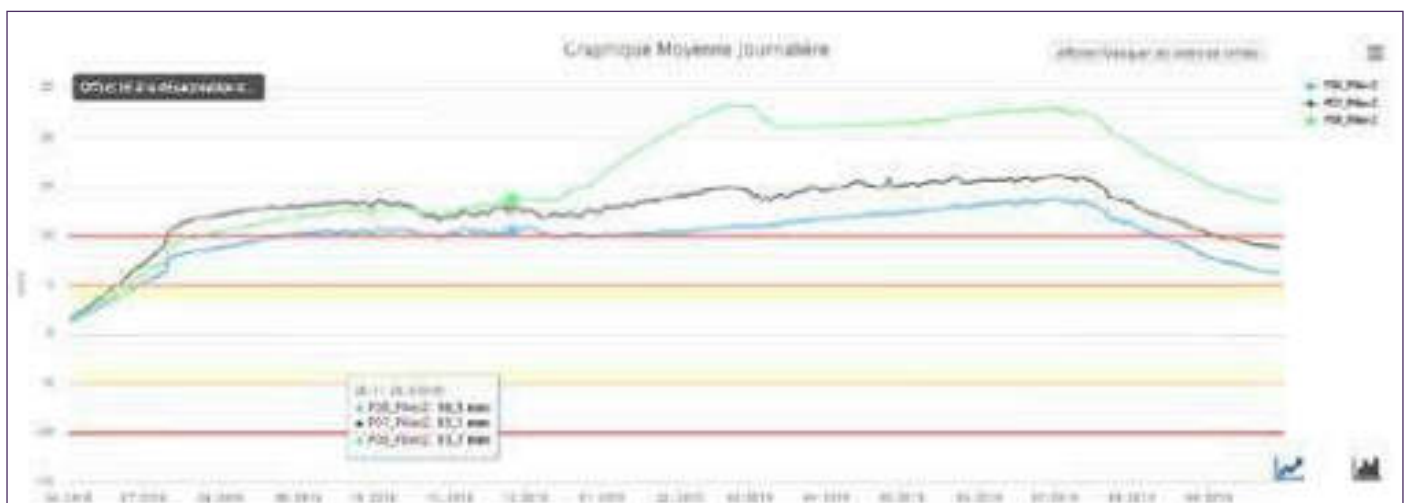


Figure 19 : Extrait du logiciel d'auscultation « geoscope»: soulèvements dès le début de la congélation et tassement à la décongélation. - *Extract from the "geoscope" survey software: heaving from the start of the freezing and settling during thawing.*

The main objectives of the sequencing for the primary freezing are therefore:

- Freeze water circulation at the Ducy limestone level as a priority,
- Then check the proper behaviour of the shell subjected to the natural circulation of the water table.

After the sequencing and then the erosion test, which proved that the shell was not eroding, the freezing of the umbrella vault could be done as early as 16 April 2018. It should be noted that the erosion test has two objectives:

- Check that the frozen shell does not erode due to groundwater circulation,
- And also to verify that the ground does not erode (increase of ground permeability following the observation of an increase of SS (suspended solids) in the waters coming from the drains).



Figure 20 : Remplissage silo d'azote - Filling nitrogen silo

The quantity of liquid nitrogen injected during the first phase was 3500m³, i.e. approximately 1m³ of nitrogen/m³ of frozen ground.

Then the cold maintenance was done with the help of a cooling unit with integrated cooling tower, with a power of 450kW.

A nitrogen silo was stored throughout the construction site to be able to “switch back” to nitrogen in case of water inflow. A cold “brine” backup unit, with the same capacity as the initial unit, was set up in case of failure. This choice was justified by the lack of feedback on similar long freezing projects (equipment wear tests etc.).

7. RER C heaving and freezing adaptation

No heave threshold of the RER C is set out in the contract. At first, settlement thresholds were used for heaving.

The initial allowable settlement of the RER C is 5 mm; it had to be re-evaluated to 40 mm during the project, following in particular a complete modelling of the existing station.

Indeed, from the first freezing phase on 19/02/2018, RER C heaves were observed, showing both a phenomenon of significant cryogenic swelling (due to cryo-suction effects) but also the presence of existing RER C foundations “working” in contact with ground freezing.

In order to limit these heaves, the following actions were carried out:

- Stop of vault freezing, and adaptation of the pre-support (armouring sheet);
- Re-heating of the frozen vault by a brine circulation at room temperature;
- Reinforcement of surveys in the RER-C;
- Increasing the brine set temperature;
- Feasibility studies of mixed brine/brine or nitrogen/brine.

The increase in the brine's set temperature, making it possible to be sufficiently safe with respect to the risk of water inflow, and limiting the RER C heave, finally constituted the driving and limiting point of the project.

Indeed, the initial set temperature of -36°C had to be raised to -28°C to stop heaving. Unfortunately, the temperature of -28°C was insufficient as tunnel excavation progressed. A sensor, identified as critical because it is located in the Ducy limestone, in a high flow zone and close to the heat source represented by the BAM shaft, reached the threshold temperature.

The pool had to quickly lower this setpoint temperature to -34°C.

This temperature could not be reached for the following reasons:

- Heat exchange (contact between frozen ground/ excavation with presence of excavation machine) became too significant,
- Wear of freezing equipment inducing a loss of yield.

Mixed freezing “nitrogen/brine” was therefore made necessary later (cf § Mixed freezing).

All of these phenomena are the consequence of freezing in a mixed front in plan view, but also in altimetry. The pool therefore adapted to carry out a “selective” freezing depending on the reaction of the ground, associated RER C heaves, but also based on the progress of the excavation (increasing heat exchange).

L'augmentation de la température de consigne de la saumure, permettant d'être suffisamment en sécurité vis-à-vis du risque de venue d'eau, et de limitation de soulèvement du RER C, a finalement constitué le point pilotant et limitant le projet.

En effet, la température de consigne initiale de -36°C a dû être remontée à -28°C pour stopper les soulèvements. Malheureusement, la température de -28°C s'est révélée insuffisante lorsque l'excavation du tunnel a progressé. Un capteur, identifié comme critique car situé dans les calcaires de Ducy, dans une zone à fort écoulement et proche de la source de chaleur que représente le puits BAM, a atteint la température de seuil de vigilance.

Le groupement a dû redescendre rapidement cette température de consigne à -34°C.

Cette température n'a pas pu être atteinte pour les raisons suivantes :

- Echange calorifique (contact sol congelé/excavation avec présence engin de creusement) devenu trop important,
- Usure du matériel de congélation induisant une perte de rendement.

La congélation mixte « azote/ saumure » a donc été rendue nécessaire par la suite (cf § Congélation mixte).

L'ensemble de ces phénomènes est la conséquence d'une congélation en front mixte en plan, mais aussi en altimétrie. Le groupement s'est donc adapté pour faire une congélation « sélective » en fonction de la réaction du terrain, des soulèvements du RER C associés, mais aussi en fonction de l'avancement de l'excavation (échange calorifique grandissant).

8. Congélation mixte « azote saumure » en simultané

Avant le démarrage de la congélation, des études ont été menées afin de définir les seuils à partir desquels la congélation à l'azote devait être relancée. Il s'agit de « re-booster » la congélation dans les zones où une érosion de la coque est constatée.

Ces critères ont été définis selon la méthode de Sanger et Sayles [2], qui considère une distribution logarithmique des températures en fonction de la distance par rapport au congélateur.

Les deux objectifs de conception étant 80 cm à -10°C et 120 cm à -2°C ; les deux alarmes suivantes sont ainsi créées :

- Alarme sur critère « orange », sécurité de 15 cm sur l'épaisseur de la coque ;
- Alarme sur critère « rouge », atteinte du critère mécanique ou étanchéité sur le point le plus défavorable.

Lors des excavations des galeries, un échange calorifique plus important est constaté et s'observe grâce

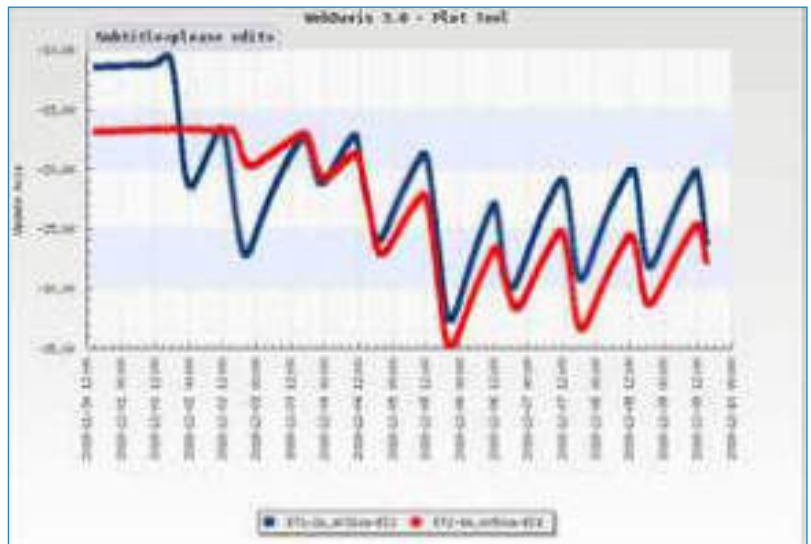


Figure 21 : Congélation mixte, extrait « Webdavis » sur le capteur ET1-2m, avec observation des oscillations de congélation - *Mixed freezing, extract of "Webdavis" on ET1-2m sensor, with observation of freezing oscillations*

à l'auscultation de la coque congelée. La réalisation du béton projeté en est l'élément dimensionnant, car une fois la chaleur d'hydratation dissipée, il agit ensuite comme un isolant thermique.

Le 29 novembre 2018, un des 161 thermocouples a présenté un dépassement de seuils à -12.22°C. Il a été décidé d'observer ce capteur pendant 24 h, tout en agissant sur les drains de l'ouvrage cadre.

Puis le 30 novembre, le groupement a procédé au basculement à l'azote des 12 forages les plus hauts du piédroit sud (6 forages côté « CSO » et 6 côté « BAM »).

Les injections d'azote se sont faites jusqu'à la fin du chantier à raison de 12 m³ d'azote par cycle de 6 heures environ.

Conclusion

La congélation de sol est un procédé complexe et contraignant de traitement de terrain dans le cas d'un sol fin, saturé en eau, avec une nappe statique (déplacement inférieur à 8 m/ jour), et lorsque les sols ne sont pas injectables.

Dans le cas de la ligne 14, station Clichy Saint Ouen, le projet de congélation se trouve confronté à la présence du RER C situé juste au-dessus. La congélation, qui garantit une étanchéité et une stabilité mécanique des terrains, a dû être contrôlée et pilotée au plus juste pour limiter le phénomène de succion cryogénique et des soulèvements du RER C associés.

Le succès de cette opération est basé sur un pilotage en partenariat avec les équipes du groupement, de la maîtrise d'œuvre, de la maîtrise d'ouvrage ainsi que du service Ingénierie de la SNCF, propriétaire de l'ouvrage SNCF ; les expériences de chacun étant complémentaires. Cela s'est caractérisé par une mise en sécurité permanente du projet, et aucun arrêt d'exploitation du RER C.

8. Simultaneous “brine/nitrogen” mixed freezing

Before the start of freezing, studies were conducted to define the thresholds at which nitrogen freezing was to be restarted. This is to “re-boost” the freezing in areas where erosion of the shell has been noted.

These criteria were defined based on the method of Sanger and Sayles [2], which considers a logarithmic

distribution of temperatures as a function of distance from the freezer.

The two design objectives being 80 cm at -10°C and 120 cm at -2°C ; the two following alarms are thus created:

- Alert on “orange” criterion, safety of 15 cm over the thickness of the shell;
- Alert on “red” criterion, achievement of the mechanical criterion or watertightness over the most unfavourable point.

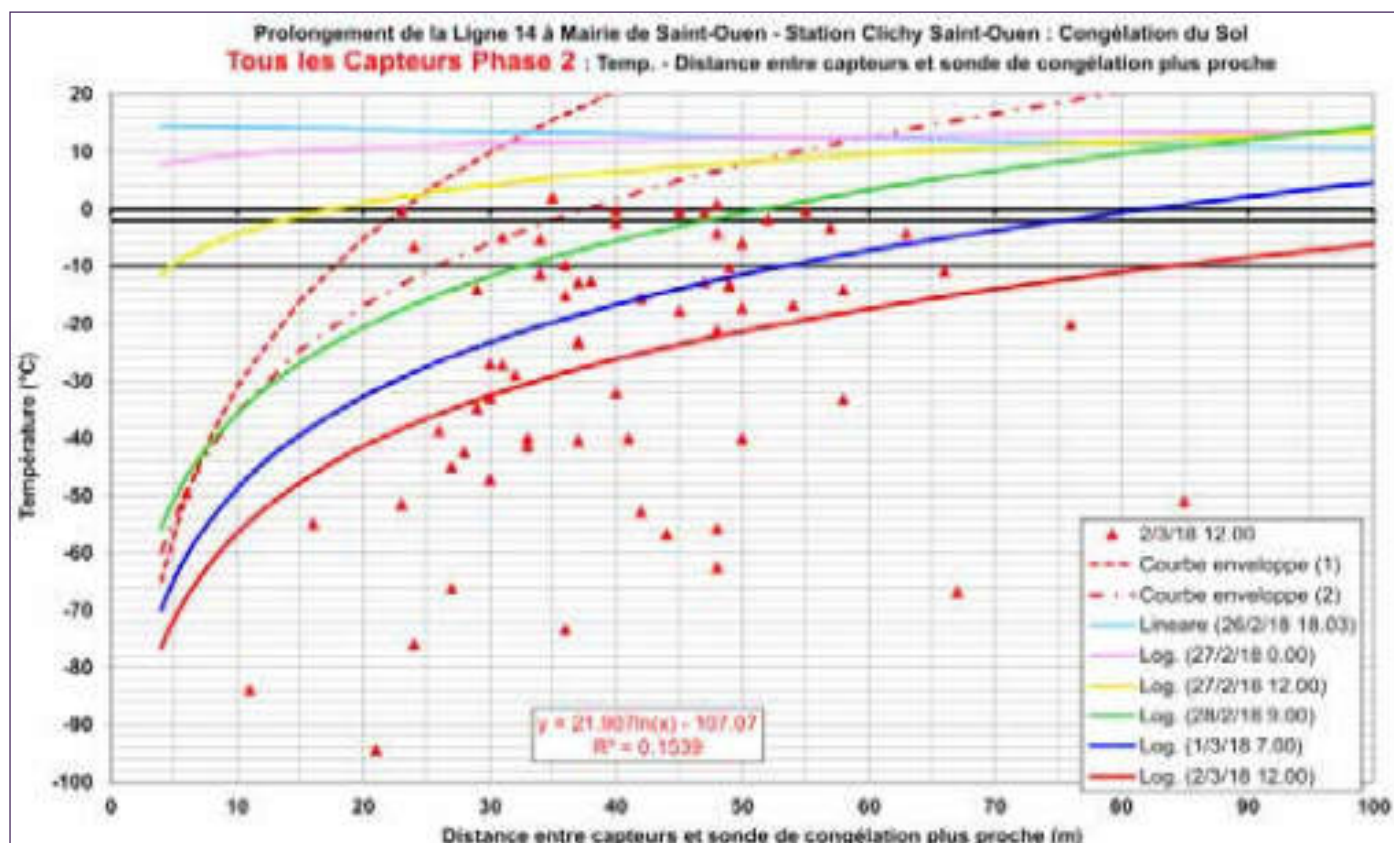


Figure 22 : Régression logarithmique des températures en fonction du temps - *Logarithmic regression of temperatures as a function of time*

During tunnel excavations, a greater heat exchange is noted and is observed thanks to the surveying of the frozen shell. The use of shotcrete is the dimensioning element, because once the heat of hydration has dissipated, it then acts as a thermal insulator.

On November 29, 2018, one of the 161 thermocouples exceeded thresholds at -12.22°C . It was decided to observe this sensor for 24 hours, while acting on the drains of the framework structure.

Then on November 30th, the pool proceeded with the nitrogen tipping of the 12 highest boreholes of the south side (6 drillings on the CSO side and 6 on the BAM side).

Nitrogen injections were done until the end of the project at the rate of 12m^3 of nitrogen per cycle of about 6 hours.

Conclusion

Ground freezing is a complex and constraining process of ground treatment in the case of fine grounds, saturated with water, with a static water table (displacement less than $8\text{m}/\text{day}$), and when the ground is not injectable.

In the case of line 14, Clichy Saint Ouen station, the freezing project was confronted with the presence of the RER C located just above. Freezing, which guarantees watertightness and a mechanical stability of the ground, had to be controlled and piloted accurately to limit the phenomenon of cryogenic sucking and heaves in the RER C that may be associated.

The success of this operation is based on management in partnership with the teams of the pool, the project management, the project owner and the engineering department of SNCF, owner of the SNCF structure; the

Remerciements :

Benjamin Lecomte/ Marc Bouffier (Vinci Construction Grand Projet, Bureau d'étude DITS),
Aline Racher et Laura Beucan (Chantiers modernes constructions),
Vittorio Manassero (Underground consulting / Expert),
Alain Guilloux (Terrasol, Experts),
Daniel Colomb et Hervé Detraz (BG ingénieurs conseil, Experts),
Patrick Lochon et Patricia Matos (Spie batignolles génie civil, Services Expertise et Structures),
Christian Gilbert, Christian Armouet et Sophie Samson (Systra- Direction de l'ingénierie)
Marine Daudane et Gilbert Lasne (RATP, Service des archives),
Christian Chereau et Philippe Chouard, (SNCF, Direction de l'ingénierie).

Crédit des photos :

Laurent BUISSART, Spie Batignolles
Alexandre SORIA, alex.soria@free.fr, Photographe

Quelques bibliographies intéressantes :

- [1] JS Harris , « Ground Freezing in practice », 1995
 - [2] Sanger and Sayles , “Frozen Ground engineering”, 1975
 - [3] Revue « Le Génie civil », Tome LV, N°25, 16/10/1909,
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6491285r.r=cong%C3%A9lation?rk=21459;2>
 - [4] RATP- Services des archives (Val de Fontenay/ Maison de la RATP)
 - [5] « Naître et Renaître , l'histoire de Spie Batignolles », Jean Monville, (Livre « Une histoire de Spie », septembre 2004
 - [6] Berthonnet Arnaud ; Léon Chagnaud : « un entrepreneur innovateur » (Livre « Histoire, économie et société », 1999, 18 année, n°3
- RUBRIQUE : MEMOIRE HISTORIQUE

ÉQUIPEMENTS SOUTERRAINS

Ventilation - Désenfumage - Colonnes sèches/humides - Métallerie spécifique - Poste de relevage - Tunnels routiers & ferroviaires -

Nos prestations :

- Etudes aérodynamiques, acoustiques, structures métalliques, BIM, simulation CFD
- Travaux neufs ou rénovation
- Installation, essais aérodynamiques - acoustiques - fumées
- Fabrication de chaudronnerie et gaines de grandes dimensions
- Maintenance préventive et curative

Nos atouts :

- Compétences reconnues en ouvrages souterrains
- Travaux de jour ou de nuit en exploitation
- Prévention, rigueur et suivi des installations dans le temps
- Mobilité géographique (national + international)

YVRoud

contact@yvroud.com - Alg Arc - 112, rue Aristide Bergès - 73220 Alton - +33 (0)4 79 44 09 69

afaq ISO 9001 ISO 14001

experience of each being complementary. This was characterised by a permanent securing of the project, and no shutdown of the RER C.

Acknowledgements:

Benjamin Lecomte/Marc Bouffier (Vinci Construction Grand Project, DITS Design Office),
Aline Racher and Laura Beucan (Chantiers modernes constructions),
Vittorio Manassero (Underground consulting/Expert),
Alain Guilloux (Terrasol, Experts),
Daniel Colomb and Hervé Detraz (BG ingénieurs conseil, Experts),
Patrick Lochon and Patricia Matos (Spie batignolles génie civil, Expertise and Structures Departments),
Christian Gilbert, Christian Armouet and Sophie Samson (Systra- Engineering Management)
Marine Daudane and Gilbert Lasne (RATP, Archives Dept.),
Christian Chereau and Philippe Chouard, (SNCF, Engineering Management).

Credit for photos :

Laurent BUISSART, Spie Batignolles
Alexandre SORIA, alex.soria@free.fr, Professional photographer

Some interesting bibliographies:

- [1] JS Harris, "Ground Freezing in practice", 1995
[2] Sanger and Sayles, "Frozen Ground engineering", 1975
[3] Journal "Le Génie civil", Volume LV, No. 25, 16/10/1909,
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6491285r.r=cong%C3%A9lation?rk=21459;2>
[4] RATP- Archive Dept. (Val de Fontenay/Maison de la RATP)
[5] Naître et Renaître , l'histoire de Spie Batignolles , Jean Monville, (Book « Une histoire de Spie », September 2004
[6] Berthonnet Arnaud ; Léon Chagnaud : Un entrepreneur innovateur (Book Histoire, économie et société , 1999, 18th year, n°3
SECTION: HISTORICAL MEMORY



Votre partenaire idéal!



Le plus grand Banc d'Essai au monde (Certifié par AMCA)

Systèmes de ventilation pour tunnels routiers et ferroviaires
Conception et fabrication sur mesure

www.zitron.com

Traversée fluviale de la Ligne 4 du métro parisien

Synthèse réalisée par Laurent BUISSART à partir d'archives

La réalisation de la ligne 4 de Paris, et notamment sa partie sous fluviale présente une des parties les plus techniques du projet de Fulgence Bienvenüe. Elle a consisté à poser des caissons immergés en fond de Seine, avec comme point singulier le raccordement à la rive gauche du petit bras de la Seine, réalisé sous congélation de sol à proximité de la fontaine Saint Michel.

Nous reprenons l'extrait du magazine la « Technique moderne 1909 », qui constituait à l'époque, et avec la revue « Le génie civil » la référence technique et scientifique dans les domaines du Génie Civil, de la chimie, l'électricité, l'aéronautique etc

L'histoire de Spie Batignolles, ainsi que de certaines filiales de majors du BTP français s'est forgée notamment avec le métro Parisien.

La technique utilisée pour cette traversée sous fluviale L4 est similaire à celle utilisée sur la L14 nord, par son ampleur. L'amélioration de la technologie permet de nos jours de forer dans de meilleures conditions, avec un niveau de précision accru, mais aussi d'utiliser l'azote liquide et des saumures à des températures plus basses.

Même si les mesures d'auscultation ont considérablement évolué depuis 120 ans, l'apparition de difficultés est toujours réelle et une certaine capacité d'adaptation n'en demeure pas moins indispensable dans notre profession.

1. « Extrait du livre Naitre et Renaitre/ une histoire de Spie » (Jean Monville)

Le projet du métro parisien tel que nous le connaissons est issu d'un concours. Entre le 5 mars et le 5 avril 1897, le préfet invita les candidats à la concession à se manifester. Il était spécifié que chacun demeurerait libre de faire les propositions que son expérience lui suggérerait, la Ville se réservant de traiter avec celui

qui apporterait la plus avantageuse. Six demandes en concession furent déposées et une commission fut constituée pour examiner, en détail, les différents projets. Celui-ci proposa de retenir, au final, que 2 d'entre eux, celui de la Compagnie Générale de Traction, filiale du groupe Empain et mère de la future Spie Batignolles, appuyée par M Schneider, et celle de M Lalance, directeur du secteur électrique de Clichy, appuyé par la banque de Paris et des Pays Bas.

Les équipes d'Edouard Empain firent un pari audacieux, non seulement elles acceptèrent toutes les conditions techniques et contractuelles de la concession, mais elles proposèrent, en outre, d'abaisser le prix du billet de 20 centimes à 15 centimes.

L'offre de la Compagnie Générale de Traction prévoyait, entre autres, des billets ouvriers au prix de 20 centimes par jours A/R, ils étaient utilisables jusqu'à 9 h du matin, et le concessionnaire en étendit la validité au dimanche matin. Il institua également un tarif de 5 centimes pour les enfants des écoles communales accompagnés de leurs maîtres. La première classe fut négociée à 25 centimes, dont 10 pour la ville.

En fait, Edouard Empain proposa à la ville une véritable politique fondée sur une hypothèse de forte élasticité de la demande, que les faits confirmèrent. Cette approche tarifaire créative n'avait pas été envisagée ni par la ville, ni par les autres concurrents qui la rejetaient.

L'ingénieur en chef Bienvenüe fit un rapport à la commission d'examen des offres, le 14 avril 1897, sur les projets retenus. Le caractère moderne et innovant du projet Empain lui valut de l'emporter. Il fut désigné à l'unanimité et le rapport de cette commission, adopté sans réserve par le préfet Julien de Sèlves, fut transmis le 8 mai 1897 à la ville de Paris.

Le rôle du baron Empain fut essentiel. Il créa en 1900, la société Parisienne pour l'industrie des Chemins de fers et des Tramway électrique, la future SPIE.

River crossing of Line 4 of the Paris metro

The construction of the line 4 in Paris, and in particular its under-river section, presents one of the most technical parts of the project of Fulgence Bienvenüe. It consisted of laying sections submerged in the Seine, with the singular point of connection being a link to the left bank of the small arm of the Seine, carried out under ground freezing near the fountain of Saint Michel.

We again borrow from an extract of the magazine "Technique moderne 1909", which constituted at the time, and with the journal "Le génie civil" the technical and scientific reference point in the fields of the Civil Engineering, chemistry, electricity, aeronautics etc...

The history of Spie Batignolles, as well as some subsidiaries of French construction majors was forged in particular through the Paris metro.

The technique used for this Line 4 underwater crossing is similar to that used on the Line 14 North, by its magnitude. Improvements in technology nowadays make it possible to drill in better conditions, with an increased level of precision, but also to use liquid nitrogen and brines at lower temperatures.

Although monitoring measures have evolved considerably over the past 120 years, the emergence of difficulties is still real and a certain capacity for adaptation remains nonetheless indispensable in our profession.

1. Excerpt from the book "Naitre et Renaitre/Une histoire de Spie" (Jean Monville)

The Paris metro project as we know it comes from a competition. Between March 5 and April 5, 1897, the prefect invited the candidates to the concession to come forward. It was specified that everyone remained free to make proposals that their experience suggested to them, with the City reserving the right to take on the one that would end up the most advantageous. Six applications for concessions were filed and a

commission was set up to examine in detail the various projects. The latter proposed to retain, in the end, only 2 of them, that of the Compagnie Générale de Traction, a subsidiary of the Empain group and mother company of the future Spie Batignolles, seconded by M Schneider, and that of M Lalance, director of mains electric in Clichy, supported by the Bank of Paris and the Netherlands.

The teams of Edouard Empain made a bold bet, not only did they accept all the technical and contractual conditions of the concession, but they also proposed to lower the price of tickets from 20 centimes to 15 centimes.

The offer of the Compagnie Générale de Traction included, among other things, workers' tickets at a price of 20 cents a day return, they could be used until 9 am, and the company extended the validity to Sunday morning. They also instituted a rate of 5 centimes for the children of the communal schools accompanied by their masters. First class was negotiated at 25 cents, of which 10 were for the city.

In fact, Edouard Empain proposed to the city a real policy based on a hypothesis of high elasticity of demand, which the facts confirmed. This creative pricing approach had not been considered either by the city or by the other competitors who rejected it.

The Chief Engineer of Bienvenüe reported to the tenders committee which projects were selected, on April 14, 1897. The modern and innovative character of the Empain project earned them the win. They were unanimously appointed and the report of this commission, adopted without reserve by the prefect Julien de Sèlves, was transmitted on May 8, 1897 to the city of Paris.

The role of Baron Empain was essential. He created, in 1900, the Parisian company for the industry of railways and electric tramways, the future SPIE.

Extrait de la « technique moderne » de 1908. Extrait des archives de la RATP

Préambule

Nous devons cette entreprise considérable à Léon Chagnaud ; de nombreuses bibliographies de son œuvre sont accessibles au public, notamment celle de Arnaud Berthonnet.

Léon Chagnaud fut un entrepreneur innovant et en avance sur son temps. Cette traversée sous fluviale montre tout son génie.

Introduction

La construction du réseau de chemin de fer métropolitain a nécessité la mise en œuvre de toutes les ressources de l'industrie moderne, par suite de la diversité des difficultés techniques à résoudre.

L'un de ces plus importants problèmes, et en même temps l'un des plus nouveaux pour la science de l'ingénieur, a été sans contredit la première traversée de la Seine en souterrain, c'est-à-dire celle de la ligne n°4 de la place Saint-Michel à la place du Châtelet, en passant sous l'île de la Cité et les deux bras de la Seine.

On peut dire que cette traversée constitue un ouvrage



Vue générale de la traversée de la Seine, extrait de plan de 1906 - *General view of the crossing of the Seine, taken from 1906 map*

A noter le décroché de la ligne 4 à cause du refus de l'académie française d'avoir un métro passant sous leur bâtiment - *Note the withdrawal of line 4 due to the refusal of the French Academy to have a metro line passing under their building*



Vue générale de la traversée de la Seine, extrait de plan de 1906, avec les caissons numérotés de 1 à 5 - *General view of the crossing of the Seine, taken from the map of 1906, with sections numbered from 1 to 5*

sans précédent dans les travaux publics. Sans doute d'autres passages sous-fluviaux ont été exécutés (sous la Tamise à Londres, l'Humber River aux Etats-Unis, etc.), mais outre que l'exemple de leur construction n'était guère encourageant, puisque les délais et prix ont dépassé toutes prévisions, aucun n'égale comme importance celui de la ligne n°4. Celui-ci est long de 1.092 mètres, passe sous deux bras de fleuve, sous un important monument (caserne de la Cité), sous deux chemins de fers en exploitation (ligne n°1 et d'Orléans) et comporte deux stations situées au-dessous du plan d'eau.

Le type de souterrain adopté pour la traversée sous la Seine est un tube métallique constitué de plaques de cuvelage en fonte dans le souterrain courant, qui est à deux voies, et en acier dans les stations. Ce cuvelage est enduit intérieurement d'une couche de béton qui le masque complètement. La section, aussi bien dans le tunnel que dans les gares, est du reste la même que celle des autres lignes métropolitaines, de sorte que les voyageurs ne s'apercevront même pas qu'ils passent sous le fleuve.

La plus grande partie de l'ouvrage a été construite au moyen du procédé de fonçage de grands caissons à air comprimé renfermant les tronçons du futur tunnel, ou ses stations. Ce mode de construction est employé pour les fondations des ponts et tous les grands travaux sous-marins, mais il a fallu une certaine hardiesse pour l'adapter à des ouvrages aussi considérables et de l'envergure d'une station de métropolitain.

Rappelons que les caissons ont été foncés au nombre de 11, dont 5 en souterrain courant, 2 formant les stations, et 4 pour leurs accès.

Les caissons de Seine ont 9m05 de hauteur ; ils sont constitués par une série de fermes espacées de 1m20 et entretoisées. Ils sont au nombre de trois dans le grand bras ayant des longueurs respectives de 36m60, 38m40 et 43m20, et de deux dans le petit bras, d'une longueur de 19m80 chacun.

Chacune des stations, « Cité » et « Place Saint-michel » est constituée par un caisson unique de 66 mètres de longueur, 12m50 de hauteur et 16m50 de largeur. A chaque extrémité de la station un caisson ou puit

Extract from “Technique moderne” from 1908. Extract from RATP archives

Foreword

We owe this considerable undertaking to Leon Chagnaud; many bibliographies of his work are accessible to the public, notably that of Arnaud Berthonnet.

Léon Chagnaud was an innovative entrepreneur and ahead of his time. This under-river crossing displays his genius.

Introduction

The construction of the metropolitan rail system required the implementation of all the resources of modern industry, due to the variety of technical difficulties to be solved.

One of these most important problems, and at the same time one of the most recent for the science of the engineer, was undoubtedly the first crossing of the Seine underground, that is to say that of the line 4 from Place Saint-Michel to Châtelet Place, passing under the Ile de la Cité and the two arms of the Seine.

It can be said that this crossing constitutes an unprecedented structure in public works. No doubt other sub-river passages were carried out at the time (under the Thames in London, the Humber River in the United States, etc.), but apart from the example of their construction, they were hardly encouraging, as delays and prices exceeded all expectations, and none were equal in size to Line No. 4. This one is 1,092 meters long, passes under two arms of the river, under an important monument (City barracks), under two operating railways (line no. 1 and Orleans) and includes two stations located below the water table.

The type of subway chosen for the crossing under the Seine is a metal tube consisting of cast iron casing plates in the current underground, which is two-tube, and steel in the stations. This casing is lined internally

with a layer of concrete which completely masks it. The section, both in the tunnel and in the railway stations, is in fact the same as that of the other metropolitan lines, so that travellers don't even notice that they are passing under the river.

Most of the structure was constructed using the compressed air sinking process for large sections, enclosing the sections of the future tunnel, or its stations. This method of construction is used for the foundations of bridges and all the great underwater works, but it took a certain boldness to adapt it to such considerable structures and the size of a metropolitan station.

Recall that the sections were sunk in the quantity of 11, including 5 current underground, 2 forming the stations, and 4 for their access.

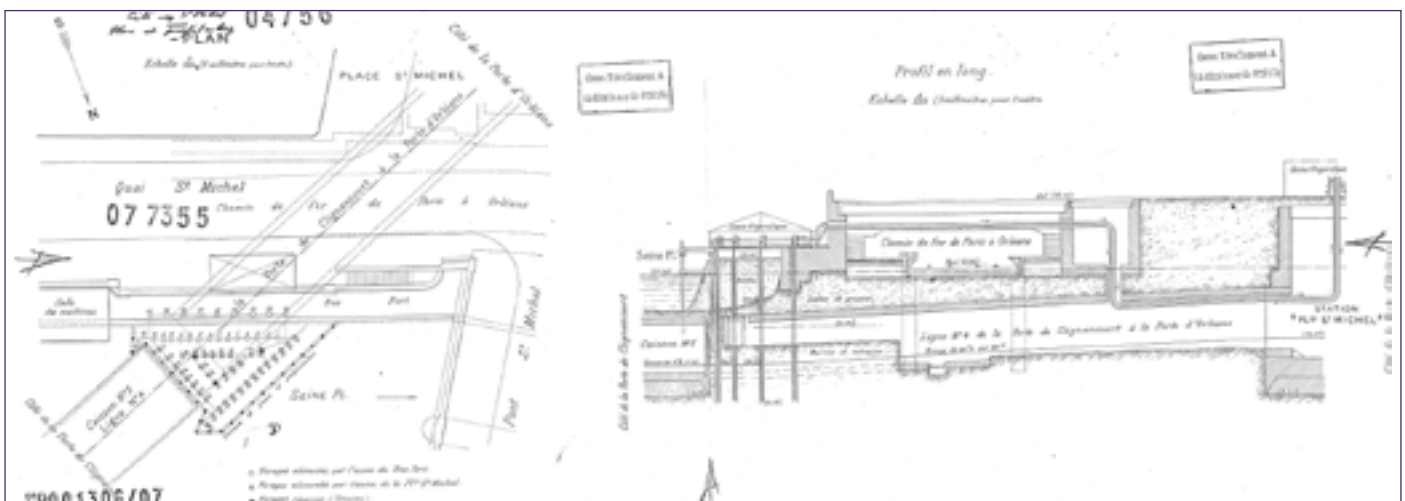
The sections under the Seine are 9m05 in height; they are made of a series of pieces spaced by 1m20 and braced. There are three in the larger arm with respective lengths of 36m60, 38m40 and 43m20, and two in the smaller arm, each 19m80 long.

Each of the stations, “Cité” and “Place Saint-Michel” is made of a single box 66 metres long, 12m50 high and 16m50 wide. At each end of the station an elliptical section or shaft 30 metres long, 24m30 to the small axis and 23 metres high is intended to receive stairs, elevators and access to facilities...

However, it is obvious that the section process could not be used in the location of certain important structures under which the route of the line passed, such as the barracks of the City and the Orleans railway.

Under the City barracks, the very great depth of the line and the relative distance of the two arms of the Seine made it possible to construct the subway by horizontal advancement, as in the ordinary works of the Metropolitan, but by sufficiently reinforcing the protective armouring.

The “Saint-Michel” station of the Orleans railway, below which the metropolitan line No. 4 passes, runs along the small arm of the Seine immediately below the platform.



Vue en plan de la zone et coupe, extrait de plan 1906 - Plan view of the area and section, extract from 1906 plan

elliptique de 30 mètres au grand axe, 24m30 au petit axe et 23 mètres de hauteur est destiné à recevoir les escaliers, ascenseurs et installations d'accès .

...Toutefois, il est évident que le procédé des caissons ne pouvait être employé à l'emplacement de certains ouvrages importants sous lesquels passait le tracé de la ligne, tels que la caserne de la Cité et le chemin de fer d'Orléans.

Sous la caserne de la Cité, la très grande profondeur de la ligne et l'éloignement relatif des deux bras de la Seine ont permis d'exécuter le souterrain par avancement horizontal, comme dans les travaux ordinaires du Métropolitain, mais en renforçant toutefois suffisamment les blindages de protection.

La station « Saint-Michel » du chemin de fer d'Orléans, en dessous de laquelle passe la ligne métropolitaine n°4, longe le petit bras de la Seine immédiatement sous le quai.

La compagnie d'Orléans s'était dès le début des travaux du Métropolitain préoccupée d'éviter le moindre affaissement de ses voies, affaissement qui eût pu interrompre les communications de sa gare terminus du quai d'Orsay. Des tassements ou affouillements étaient certainement inévitables ; aussi pour éviter tout accident, cette Compagnie a fait au préalable foncer sous la station plusieurs caissons descendus plus bas que le souterrain du Métropolitain. Ces caissons bétonnés forment de véritables pilotis qui supportent les voies et les ont rendus indépendamment des mouvements de terrain provenant du Métropolitain.

Ils ont été construits au nombre de 13 dans la station de la Compagnie d'Orléans et leur fonçage n'a été arrêté qu'à 15 mètres plus bas, à une côte inférieure à celle du radier du Métropolitain.

Toutefois, les murs de la station d'Orléans supportant les tabliers sous chaussée n'ont pu être protégés par cet ensemble de travaux. A ce croisement, il fallait donc adopter un mode de construction absolument sûr pour éviter le moindre affaissement sous cette ligne, dont on ne pouvait à aucun prix interrompre la circulation, et prévoir d'autre part le raccordement de cette section avec le caisson voisin foncé dans le petit bras de la Seine.

La congélation

La solution à ce problème complexe a été demandée à un procédé tout à fait moderne de construction : **la congélation du sol**, maintenant employée couramment pour la construction de puits de mines ou de sondages dans les terrains aquifères, mais dont l'application n'avait pas encore été tentée dans le percement de galeries horizontales.

La congélation d'un massif de terrain aussi important a nécessité l'installation d'une puissante usine frigorifique à proximité de l'ouvrage, sur la place Saint-Michel. Une double canalisation conduit le liquide réfrigérant de compresseurs dans un circuit de tubes



Installation de congélation en surface - Surface freezing installation

de sondages enfoncés dans le massif de terrain à congeler, où il circule, gèle le terrain avoisinant les tubes par rayonnement, et revient à l'usine, centre de ce mouvement circulatoire.

Comme on le voit sur le profil en long de la ligne, le projet primitif prévoyait l'exécution après congélation de toute la partie de souterrain comprise entre le dernier caisson du petit bras de la Seine et le caisson-station « Place Saint-Michel », soit une longueur de 64 mètres. Cette section devait être congelée au moyen de deux installations : l'une place Saint-Michel alimentant un circuit de congélation horizontale de 55 à 60 mètres de longueur, l'autre sur le bas-port desservant un autre circuit de congélation verticale pour la partie qui resterait à exécuter.

Nous allons examiner par suite de quelles circonstances ce programme fut modifié et réduit à la congélation verticale.

La congélation horizontale devait être réalisée par l'enfoncement de 24 tubes de 60 mètres de longueur répartis sur le périmètre de la section du souterrain. L'installation de forage de ces 24 trous fut établie dans le puits elliptique, côté Seine, de la station « Saint-Michel », sous l'usine frigorifique que nous décrivons plus loin. Elle se composait de deux sondeuses hydroélectriques installées sur un pont mobile et un bâti permettant le déplacement des sondeuses dans le champ de la périphérie du souterrain.

Chaque sondeuse est actionnée par un moteur de 30 H.P. à 1.100 tours et comporte un train d'engrenage réducteur de vitesse pour la commande de rotation de la tige de sonde. Le moteur et la presse hydraulique sont superposés et leurs axes montés sur pivot peuvent prendre l'inclinaison de 0m04 par mètre sur l'horizontale, pente du souterrain dans cette section.

La tige de sonde est entraînée par un arbre creux se mouvant à l'intérieur de la tige de piston de la presse, et recevant son mouvement du train d'engrenages commandé par le moteur.

The Orleans company had from the beginning of the Metropolitan works taken measures to avoid the slightest subsidence of its tracks, the collapse of which could have interrupted the communications of its terminal station at the Quai d'Orsay. Settlements or excavations were certainly inevitable; Also, to avoid any accidents, the company had previously sunk several sections below the Metro underground station. These concreted sections formed veritable piles that support the tracks and have made them independent of the movements of land emanating from the Metropolitan.

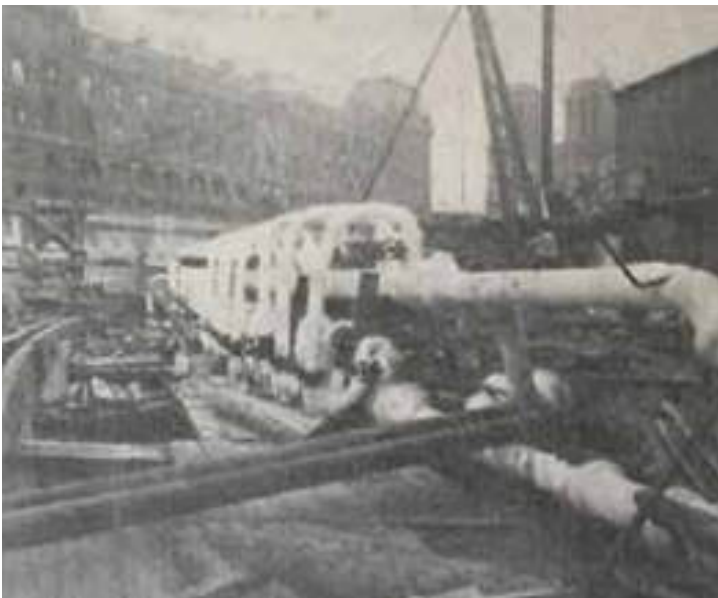
They were built in a quantity of 13 in the station of the Orleans Company and their sinking was stopped only 15 metres lower, at a side lower than that of the Metropolitan foundation.

However, the walls of the Orleans station supporting the under-pavement deck could not be protected by this set of works. At this intersection, it was therefore necessary to adopt an absolutely safe mode of construction to avoid the slightest subsidence under this line, the traffic of which could not be interrupted at any cost, and to provide for the connection of this section with the neighbouring section sinking in the little arm of the Seine.

Freezing

The solution to this complex problem was sought from a very modern method of construction: the freezing of the ground, now widely used for the construction of mine shafts or boreholes in aquifers, but the application of which not yet tried in the drilling of horizontal galleries.

The freezing of such a large piece of land necessitated the installation of a powerful refrigeration plant near to the structure at Place Saint-Michel. Double pipework leads the refrigerant liquid from compressors in a circuit of probe tubes driven into the mass of ground to freeze,



Installation de congélation en surface sur le petit bras de la seine - Surface freezing installation on the small arm of the Seine

where it circulates, freezes the ground bordering the tubes by radiation, and returns to the plant, the centre of this circulatory movement.

As can be seen on the longitudinal profile of the line, the original project provided for the freezing of all the underground part between the last section of the small arm of the Seine and the section of the "Place Saint-Michel" station, a length of 64 metres. This section was to be frozen by means of two installations: one at place Saint-Michel feeding a horizontal freezing circuit of 55 to 60 metres in length, the other on the lower part serving another vertical freezing circuit for the part which would remain to be carried out.

We will examine under which circumstances this schedule was modified and reduced to vertical freezing.

Horizontal freezing was to be achieved by the sinking of 24 tubes of 60 metres length distributed over the perimeter of the subway section. The drilling rig of these 24 holes was established in the elliptical shaft, Seine side, of the station "Saint-Michel", under the refrigeration plant that we describe below. It consisted of two hydro-electric probes installed on a movable bridge and a frame allowing the displacement of the probes in the area of the underground periphery.

Each rig is powered by a 30 HP engine at 1,100 rpm and features a speed reduction gear train for control of the rotation of the probe rod. The engine and the hydraulic press are attached and their pivot-mounted axles can take the inclination of 0m04 per metre on the horizontal, subterranean slope in this section.

The probe rod is driven by a hollow shaft moving within the piston rod of the press, and receiving its movement from the gear train controlled by the engine.

The probe tube has a 150mm outer diameter and 10mm thickness. It consists of lengths of 3 metres and is completed by a cutting kit allowing its insertion by drill without rotation.

The probe rod consists of a second tube of 128 mm in diameter and 9 mm thick. Every three meters a guide with three branches is placed to keep it along its axis. It is completed by a hollow steel crown with a dozen diamonds set on its perimeter.

The water is compressed in the rod at a pressure of 30 kg which allows it to clear and push back the ground crushed by the crown, which it does at the same time as cooling. The probe controls the movement of the crown at the same time as its rotation. When the hole has reached 0m40 in length, the guide tube is sunk accordingly.

This probe system normally operates in the first 20 to 30 metres crossed, consisting of marl or compact limestone banks, but then the terrain was composed of sand mixed with flint in a high proportion. The flint debris was then caught between the guide and the crown, whose diamonds were quickly lost.

Le tube de sondage a 150mm de diamètre extérieur et 10mm d'épaisseur. Il est constitué en longueurs de 3 mètres et est terminé par une trousse coupante permettant son enfoncement par la sondeuse sans rotation.

La tige de sonde est constituée par un second tube de 128 mm de diamètre et 9mm d'épaisseur. Tous les trois mètres un guide à trois branches est placé pour la maintenir dans son axe. Elle est terminée par une couronne creuse en acier garnie d'une dizaine de diamants sertis sur son pourtour.

L'eau est comprimée dans la tige à une pression de 30 kg qui lui permet de dégager et ramener en arrière le terrain broyé par la couronne, dont elle assure en même temps le refroidissement. La sondeuse commande la translation de la couronne en même temps que sa rotation. Lorsque le trou a atteint 0m40 de longueur, le tube de guidage est enfoncé d'autant.

Cette installation de sondage fonctionna normalement dans les 20 à 30 premiers mètres traversés, formés de marnes ou bancs de calcaire compacts, mais ensuite le terrain se trouva composé de sable mélangé de silex dans une forte proportion. Les débris de silex se coinçaient alors entre le guide et la couronne dont les diamants étaient par suite rapidement dessertis et perdus.

L'avancement d'un forage dans ces conditions se réduisait à moins de 1m50 par jour et était, d'autre part, très onéreux, le prix de la couronne diamantée atteignant 10.000 francs. On essaya alors de percer le souterrain dans cette partie au moyen de la galerie de faite de 1m80 couramment employée ; les résultats de cet essai ayant été satisfaisants, les forages pour la congélation horizontale ne furent pas continués, d'autant plus que la dislocation du terrain sableux provoquée par cette galerie faisait craindre la rupture des tubes.

La congélation verticale a toutefois été exécutée avec succès dans la partie la plus dangereuse de cette section, partie comprise entre le caisson foncé en Seine et la station de l'Orléans.

Le terrain aquifère compris entre l'extrémité du caisson et la partie ayant pu être exécutée par cheminement horizontal est composé de divers éléments, vase, sable, marne et calcaire non compact. Il est en grande partie situé sous le lit même du fleuve. La masse du noyau à congeler se décomposait en environ 750m³ d'eau et 1.400m³ de parties solides.

Pour la partie immédiatement sous la Seine, un remblai fut établi jusqu'à un mètre environ au-dessus du niveau de l'eau dans une enceinte de pieux et palplanches battue à 4 mètres à l'extérieur de l'emprise du souterrain. Dans ce remblai furent forés soixante trous de 0.25 environ de diamètre et de 17 mètres de profondeur, descendant à un mètre environ au-dessous du radier du souterrain.

La distance entre ces forages était, en général, de 1m20. Ces trous furent tubés au moyen de tubes en tôle rivés à bout. Le forage a été exécuté avec deux sondeuses à chute libre montées sur trépied, qui sont visibles au premier plan de la vue générale du chantier (fig. 2).

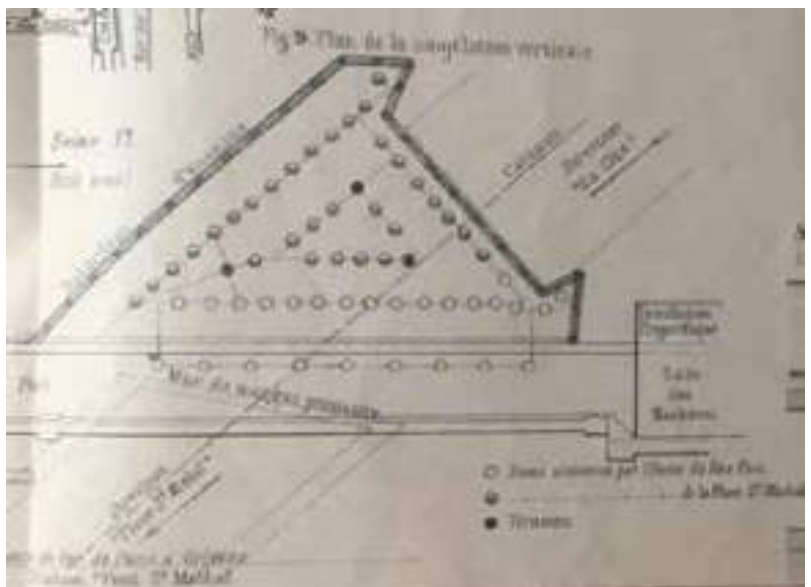
Dans chacun de ces tubes il fut descendu, jusqu'au voisinage du fond, des colonnes de congélation formées d'un tube central de 0m10 environ de diamètre fermé à sa partie inférieure et contenant lui-même un tube de 0m035 de diamètre ouvert à sa partie inférieure.

La longueur totale des circuits était d'environ 970 mètres. Leur surface transmettait au terrain humide une puissance réfrigérante de 250 frigories par mètre carré et par heure.

Des tubes témoins, ou de contrôle, furent enfoncés dans le massif aux points les plus éloignés des divers circuits. L'eau repoussée par l'expansion de la glace environnante montait progressivement dans ces tubes, ouverts à leur extrémité inférieure et s'y congelait à son tour, confirmant ainsi la congélation complète du massif.

Un mélange incongelable (saumure d'eau et de chlorure de calcium 30° à l'aréomètre Beaumé) refroidi à 20° (et même jusqu'à 24°) est envoyé dans le tube central de 0.035 et remonte dans l'espace annulaire compris entre ce tube et le tube de 0m10.

Chaque tube réfrigérant ayant un rayon d'action de plus d'un mètre, le froid se transmet au terrain environnant qui gèle de proche en proche et devient, par suite, compact et étanche, fondées sur ce nouveau procédé de travail souterrain : le terrain a été complètement solidifié dans la section du tunnel, et malgré divers arrêts accidentels des machines frigorifiques, sa dureté était telle qu'on a dû employer quelquefois la mine pour le déblaiement.



Vue en plan/ forages de congélation - Plan view/freezing drilling

The progress of drilling in these conditions was reduced to less than 1m50 per day and was, on the other hand, very expensive, the price of the diamond crown reaching 10,000 francs. They then attempted to pierce the underground in this part by means of the gallery of 1m80 commonly used; the results of this test were satisfactory, and so the drilling for horizontal freezing was not continued, all the more as the dislocation of the sandy ground provoked by this gallery caused a concern for a rupture in the tubes.

Vertical freezing has however been successfully performed in the most dangerous part of this section, the part between the sunk sections in the Seine and the station of Orleans.

The aquifer between the end of the section and the part that could be executed by horizontal pathways is composed of various elements, vase, sand, marl and non-compact limestone. It is for the most part under the bed of the river itself. The mass of the core to be frozen was divided into about 750 cubic metres of water and 1,400 cubic meters of solid parts.

For the part immediately below the Seine, an embankment was built up to about a metre above the water level in a pile and sheet-pile enclosure at a distance of 4 metres outside the subterranean allowances. In this embankment were drilled sixty holes of about 0.25 diameter and 17 metres deep, down to about one metre below the raft foundation of the underground.

The distance between these boreholes was, in general, 1m20. These holes were encased by means of sheet metal tubes riveted at the end. Drilling was performed with two tripod-mounted free-fall probes, which are visible in the foreground of the general view of the site (Figure 2).

In each of these tubes, freezing columns formed from a central tube of about 0m10 in diameter at its lower part and containing a tube of 0m35 in diameter open at its base, were lowered down to the vicinity of the lower part.

The total length of the circuits was about 970 metres. Their surface transmitted to the humid ground a refrigerating power of 250 frigories per square metre and per hour.

Control or inspection tubes were driven into the rock mass at the points furthest away from the circuit tubes. The water repelled by the expansion of the surrounding ice gradually rose in these tubes, open at their lower end and froze in turn, thus confirming the complete freezing of the rock mass.

An incongruable mixture (brine and calcium chloride 30° with the Beaumé hydrometer) cooled to -20° (and even down to -24°) was sent into the central tube of 0.035 and back into the annular gap between this tube and the tube of 0m10.

For each cooling tube with a radius of action of more than one metre, the cold is transmitted to the surrounding ground which freezes gradually and becomes, consequently, compact and watertight, based on this new underground working method: the ground was completely solidified in the section of the tunnel, and in spite of various accidental stops of the refrigerating machines, its hardness was such that it was sometimes necessary to use mines for clearing.

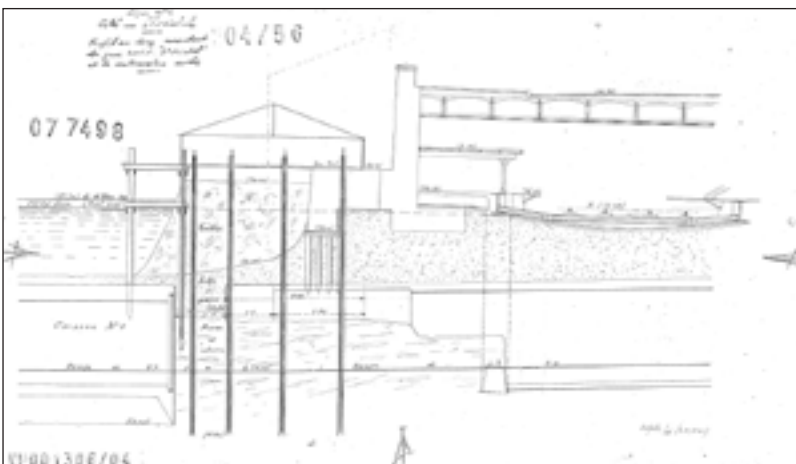
Construction difficulties

An accident that could not be predicted or avoided has highlighted even further the good results obtained. About three months after the beginning of the freezing, while there were only a few metres to break, a sudden flood into the works happened, giving serious concerns to the engineers.

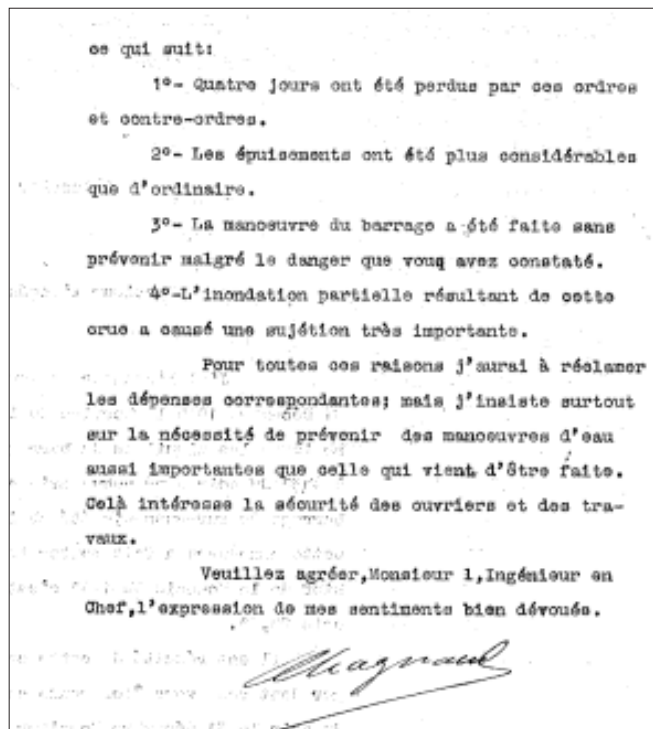
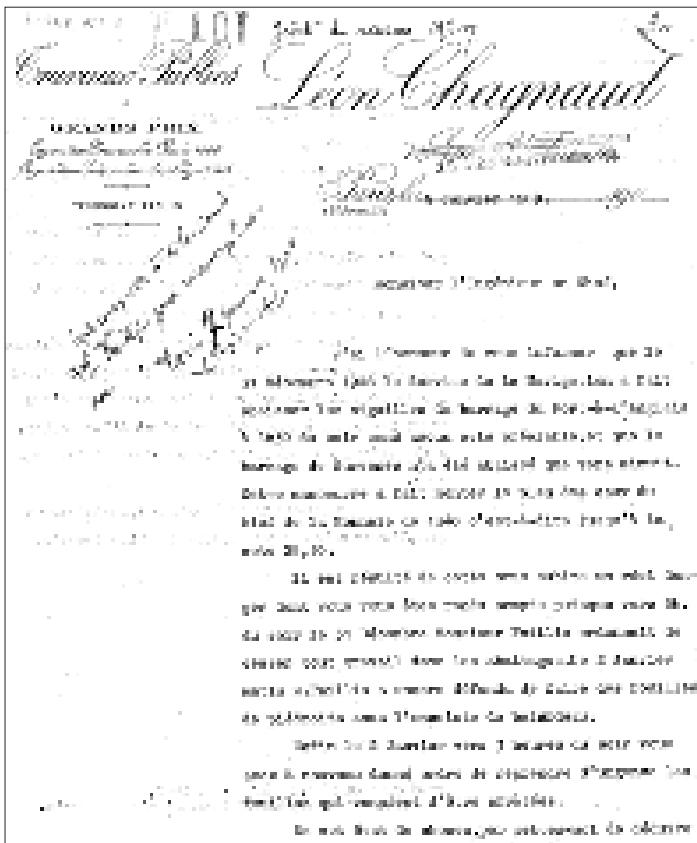
A stream of water passing under the platform upstream and across the foundations of the Orleans Company station, had bypassed the frozen mass, bursting through suddenly and completely filling the underground section being drilled.

The research undertaken immediately into the origin of this flood showed that we were in the presence of a current of water coming from very far away and circulating under the low-port. The platform wall in particular had insufficient foundations made up of simple stones made on a bed of sand. -> After bibliographic research, it was a failure of piloting the needle weir of the Port à l'Anglais on December 31st, 1908 (cf following page)

To remedy this situation, an 80-metre-long cofferdam was built along this platform, which it intersected even at its end to completely isolate the low-port. The current of water was thus cut off and it was then possible to begin to excavate the underground, filled with water including the Saint-Michel station. This depletion was carried out in three to four days, thanks to the implementation of half a dozen 125 to 250mm pumps.



Profil en long de la zone avec forage de congélation - Longitudinal profile along the zone with freezing drilling



Extrait d'un courrier rédigé par Léon Chagnaud concernant l'évènement du 31 décembre 1908 - Excerpt from a letter written by Léon Chagnaud concerning the event of December 31, 1908

Difficultés de réalisation

Un accident qu'on ne pouvait prévoir ni éviter est du reste venu mettre encore plus en valeur les bons résultats obtenus. Environ trois mois après le commencement de la congélation, alors qu'il ne restait que quelques mètres à percer, une inondation subite des travaux vint donner de sérieuses inquiétudes aux ingénieurs.

Un courant d'eau passant sous le quai amont et à travers les fondations de la station de la Compagnie d'Orléans, avait contourné le massif congelé faisant irruption brusquement et remplissant complètement la partie de souterrain en percement.

Les recherches entreprises aussitôt sur l'origine de cette inondation montrèrent qu'on se trouvait en présence d'un courant d'eau venant de très loin et circulant sous le bas-port. Le mur de quai notamment avait des fondations insuffisantes constituées par de simples encochements faits sur un lit de sable. -> Après recherche bibliographique, il s'agissait d'un défaut de pilotage des aiguilles du barrage du Port à l'Anglais du 31 décembre 1908 (cf page suivant)

Pour remédier à cette situation, un batardeau de 80 mètres de longueur fut construit le long de ce quai, qu'il recouvrait même à son extrémité pour isoler complètement le bas-port. Le courant d'eau fut ainsi coupé et l'on put alors commencer à épuiser le souterrain, rempli d'eau y compris la station Saint-Michel. Cet épuisement a été effectué en trois à quatre jours, grâce à la mise en œuvre d'une demi-douzaine de pompes de 125 à 250mm.

Il était alors à craindre que pendant le temps assez long nécessité par l'obturation des venues d'eau et l'épuisement des travaux, le massif ne dégelât complètement, compromettant ainsi la sécurité de tous les ouvrages environnants.

Mais il n'en fut rien et après remise en état de lieux, on constata même la formation d'une muraille de glace formée de l'eau d'irruption congelée à l'ancien avancement !

Divers procédés furent essayés pour la démolition rapide du massif congelé : marteaux pneumatiques, chalumeau oxydrique devant découper des blocs par le dégel, etc. Mais ils ne donnèrent pas de résultats concluants, et le gros œuvre du percement fut effectué à la pioche ; l'emploi de la mine était en effet dangereux par suite de la proximité des fondations du mur de quai et de la présence des tubes de congélation.

La maçonnerie du souterrain s'est effectuée sans encombre, le terrain étant resté congelé pendant plusieurs jours après l'arrêt des machines frigorifiques. Les tubes ont été ensuite retirés et leurs trous remplis de béton.

Le prix de revient du tronçon construit à l'aide de la congélation du sol a été sensiblement plus élevé que celui des autres sections, étant donnée l'importance de la machinerie mise en œuvre. Mais il ne faut pas oublier que c'était la seule solution pratiquement possible de ce passage dangereux ; sa réalisation a démontré l'efficacité du procédé de congélation dans certains travaux souterrains dont il accroîtra la sécurité, souvent bien précaire.

It was then to be feared that during the rather long time required by the sealing of the inflow of water and the excavation of the works, the rock mass would not thaw completely, thus compromising the safety of all the surrounding works.

But nothing came of it and after reinstatement of the location, they even noticed the formation of an ice wall formed from the frozen irruption water from the previous advancement!

Various processes were tried for the rapid demolition of the frozen rock mass: pneumatic hammers, oxyhydric torch to cut blocks by thawing, etc. But they gave no conclusive results, and the main body of the piercing was done by pickaxe; the use of mines was indeed

dangerous due to the proximity of the foundations of the platform wall and the presence of the freezing tubes.

The masonry of the underground was done without hindrance, the ground being frozen for several days after the stop of the refrigerating machines. The tubes were then removed and their holes filled with concrete.

The cost price of the section built using ground freezing was significantly higher than that of other sections, given the level of machinery implemented. But we must not forget that it was the only practically possible solution of this dangerous passage; its construction has demonstrated the effectiveness of the freezing process in some underground works, increasing safety in an often very precarious situation.



Carton d'invitation de la Municipalité pour assister à l'inauguration du passage sous la Seine - *Card of invitation from the Municipality to attend the inauguration of the passage under the Seine*