

## LES TUNNELS DE LOK MA CHAU A HONG KONG – VERS UNE PROTECTION TOTALE DE L'ENVIRONNEMENT

### THE LOK MA CHAU TUNNELS IN HONGKONG – TOWARDS A GLOBAL ENVIRONMENTAL PROTECTION

Olivier MARTIN - Gilles CACHIA - Benjamin KITZIS - Benoît BROUDY  
BOUYGUES TP

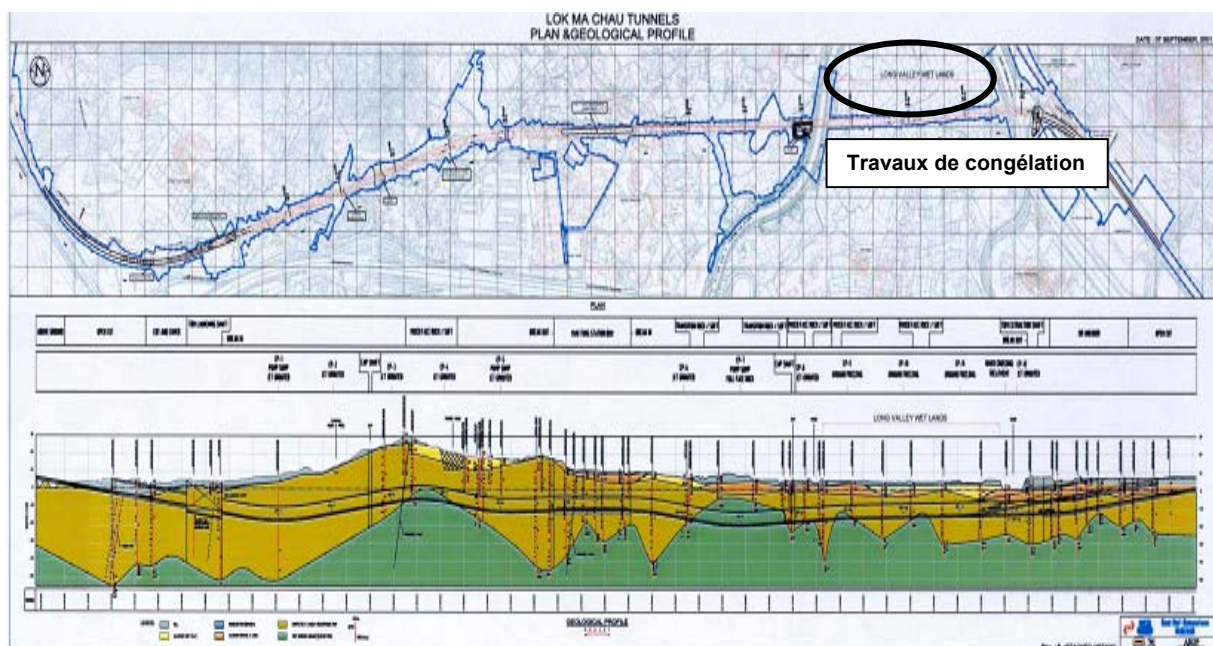


Figure 1

## 1. INTRODUCTION

Le projet de Lok MA Chau est une liaison souterraine de 5 km de longueur, qui comprend un échangeur en surface avec la ligne Principale Hong-Kong – Shenzhen – Canton, à l'est du territoire, qui transporte tous les jours plus de 200,000 personnes au travers de la frontière, un tunnel double de 3,7 km de longueur et une tranchée de remise à niveau pour transférer les voies sur le viaduc d'arrivée à la station Lok Ma Chau situé sur la coté Ouest de la frontière (Figure 1).

Les deux tunnels sont reliés entre eux tous les 240m par des inter-tubes et tous les 1000m par des puits d'accès pompiers. Les trois inter-tubes situés dans la zone écologique sont l'objet de cet article (Figure 2).

Les travaux de congélation permettent la réalisation de galeries de 4m de diamètre et 6m de longueur entre les deux tubes principaux de circulation ferroviaire de 7,60m de diamètre intérieur.

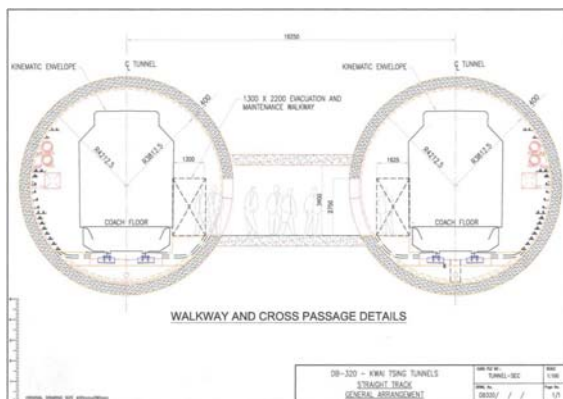


Figure 2 – Coupe type des inter tubes

La géologie a fait l'objet d'une étude très poussée pour déterminer d'une part les interfaces rocheuses et d'autre part les propriétés des couches de tuff (rocher volcanique) altérées et décomposées qui englobent les trois projets de congélation (Figure 3).

## 2. ETUDES ET PREPARATION DES TRAVAUX

La préparation du chantier s'est élaborée pendant l'année précédant les premiers travaux et peut se résumer à :

- 2 mois d'études préliminaires,
- 4 mois d'études de sensibilité,
- 4 mois d'essais sur carottes congelées,
- 2 mois d'études d'exécution,

## 1. INTRODUCTION

*The Kowloon-Canton Railway Corporation (KCRC) Spur Line comprises a tunnel section, a viaduct section and a new station on the border with Mainland China. The Contract LDB201 Sheung Shui to Chau Tau tunnels is the underground section of the Spur Line. The project comprises dual 3.25 km bored tunnels and approx. 1.1km of cut and cover tunnels at the eastern and western tunnel approaches (Figure 1).*

*Two vertical shafts are formed to provide access for the fire services and cross-passages were formed every 240m (total of 12no.) to allow access between the two tunnel tubes in the event of an incident (Figure 2).*

*The cross passages were formed in different ground conditions along the tunnel alignment, ranging from strong rock to soils.*

*A detailed study was carried out to define the rock/soil interfaces and the geotechnical properties of the completely decomposed volcanics. Figure 3 shows a photograph of split cores of typical samples of CDV.*

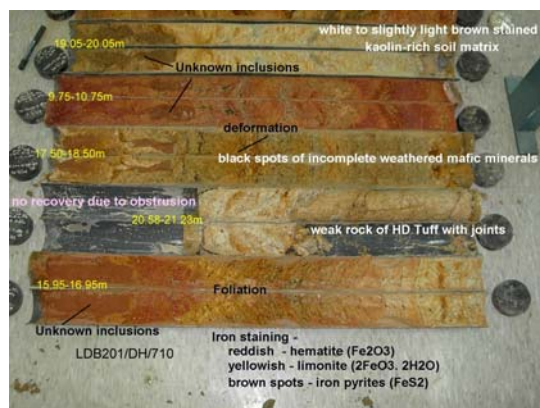


Figure 3 – Typical CDV split cores

*A typical section through a cross-passage is shown in Figure 2.*

## 2. DESIGN AND PREPARATORY WORKS

*The technical preparation and definition of the ground treatment by ground freezing was carried out over a period of one year preceding the commencement of works on site. These works included:*

- 2 months of preliminary design;
- 4 months of testing of frozen soils;
- 4 months of sensitivity analysis and
- 2 months of detailed design.

Les essais ont été menés dans l'optique de cerner la sécurité des travaux, de définir le schéma optimum de congélateurs permettant de démarrer les travaux au bout de 4 semaines et de réduire le délai de creusement et de réalisation des inter-tubes. La durée de congélation variait de 3 à 10 semaines suivant les 6 versions testées pour la configuration des congélateurs.

Les essais ont été réalisés au Canada par le Professeur Sego. Ils ont montré des résistances instantanées de 2 à 3 MPa, des modules de 200 à 400 MPa, très peu de fluage et de gonflement sous pression. Les essais d'identification ont donné des conductivités thermiques et des chaleurs latentes semblables aux sables limoneux. Il est bon de noter la grande précision des corrélations thermiques entre calculs et mesures in-situ.

Le code aux éléments finis ANSYS a permis de simuler les conditions thermiques, les contraintes dans le sol, les déformations des tunnels principaux.

Le modèle 2D (Figure 4) permet en fonction de la position réelle des congélateurs de déterminer le champ des températures puis le champ des contraintes et des déformations.

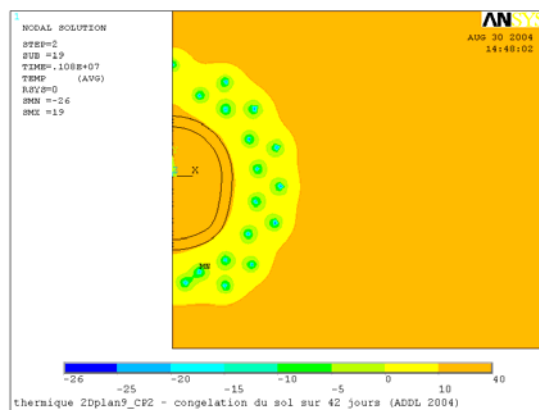


Figure 4 – Modèle 2D plan

Les modèles 2D axisymétriques permettent d'estimer les déformations du tunnel lors de la prise de la glace. Le modèle 3D permet d'estimer l'interaction entre tunnels principaux et les inter tubes. Notamment, il permet d'appréhender les déformations des tunnels principaux et l'ouverture potentielle des joints.

Le modèle 3D (Figure 7) permet de valider le passage par les deux modèles simplifiés, la prise en compte des effets de bord, et de la courbure des tunnels principaux. Il a donné l'image réelle du champ des températures et des points critiques pour leur contrôle. Il a permis le positionnement optimum des points d'instrumentation et de suivi thermique.

Testing of soil samples was carried out to confirm the response of the completely decomposed rock to freezing and to develop an optimised freeze pipe layout that would ensure that the treatment was achieved within the 4 weeks allowed in the overall construction programme.

The testing on frozen samples was carried out at the University of Alberta under the supervision of Prof D. Sego. This was the first time such tropical decomposed rocks had been tested and a conservative interpretation of the results was adopted, since there was no body of comparative testing data. The results indicated an instantaneous strength of 2 MPa to 3 Mpa, an initial modulus of 200 to 400 MPa, with very low creep and heave potential.

A typical result from an unconfined compressive strength test is shown in Figure 5 and the form of brittle failure observed in the specimens is shown in Figure 6.

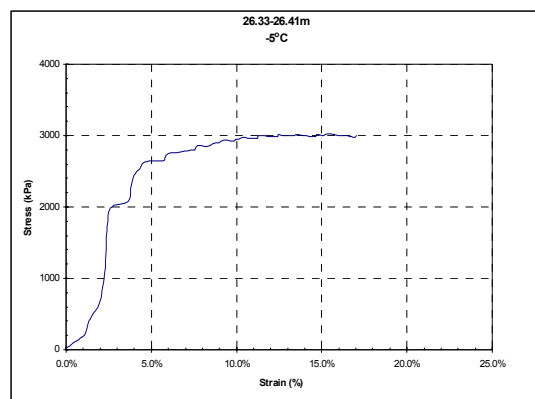


Figure 5 – Strength testing at 1%/min



Figure 6 – Specimen after failure

Three ANSYS models were used during the design stage to simulate the thermal conditions, the stresses in soil and the deformation at surface and on the main tunnels caused by the ice growth.

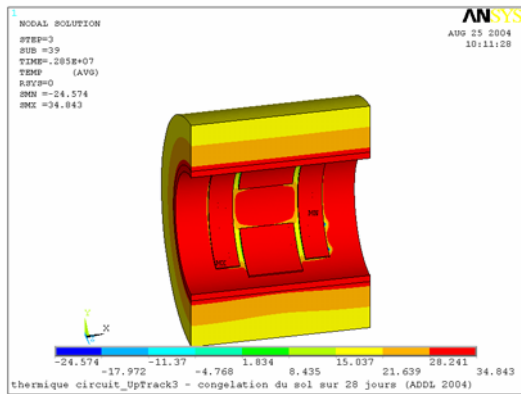


Figure 7– Modèle 3D

La détermination des contraintes initiales et l'impact du creusement des tunnels, et les critères de résistance ont été déterminés à l'aide du programme spécialisé PLAXIS

### 3. LES TRAVAUX

Les travaux relatifs aux trois inter-tubes ont été organisés à partir d'une même architecture d'usine de froid et avec l'objectif de pouvoir réaliser les trois unités en parallèle (Figure 8).

La préparation des forages, leur réalisation, le montage des groupes de congélation et les tuyauteries, leur branchement et les essais de vide ont duré 3 mois.

L'alimentation en froid à chacun des inter-tubes s'est faite au travers de 8 séries de tubes de congélation à double circuit concentrique de diamètre 40mm intérieur et 60mm extérieur (Figure 9).

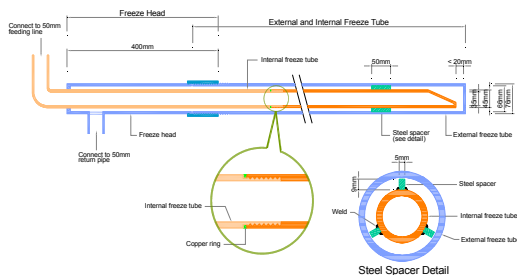


Figure 9 - Schéma des congélateurs

L'excavation s'est faite en 3 cycles 24h sur 24 permettant ainsi une activité plus rapide et une surveillance permanente des groupes, des tuyauteries, des sondes thermiques dans le sol, et dans l'environnement des travaux, des jauges de contraintes dans les cintres raidisseurs. Le sol a présenté des duretés analogues à celles de rocher tendre avec des résistances instantanées de 5 à 10 MPa en accord avec les mesures effectuées.

2D plane models (Figure 4) enabled the thermal fields to be assessed and then the stress and deformation fields to be related to the positioning of the freeze tubes. 2D axi-symmetrical models enabled estimation of the time to the closure of the ice ring on the main tunnel and the deformation of the tunnels resulting from the ice growth.

More complex 3D models (Figure 7) were used as a final check of the accuracy of the 2D models and the initial stresses in ground.

Several iterations of modelling were run to optimise the number and spacing of the freeze tubes taking account of the required programme for the freeze and also the need to limit the number of holes drilled through the permanent main tunnel lining.

The impact of the TBM on the "at rest" ground stresses was estimated via the PLAXIS computer programme.

### 3. THE WORKS ORGANISATION

To ensure an efficient connection of the ice ring with the second tunnel lining small cooling units were installed in the second tunnel at each cross passage location (Figure 8).

The tunnel lining was cooled through a series of insulated tubes fixed to the tunnel lining, thus encouraging the ice growth from the ends of the freeze pipes drilled from the first tunnel to the extrados of the second tunnel (Figure 9).

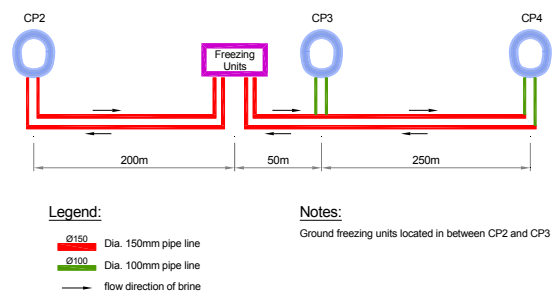


Figure 8 – Schematic of Freeze Plant

The excavation works were carried out 24 h per day, 7 days a week in order to accelerate the activity and keep the work area under permanent supervision. Excavation of each cross passage, including consecution of the permanent lining, took less than the predicted 8 weeks. Continuous checking of the freeze plant, piping, thermal sensors, air temperature, deformation of main tunnels and strains in tunnel support frames was carried out to control the works.

Elle s'est faite avec des moyens traditionnels et la résistance moyenne du sol congelé a permis à la fois la stabilisation du front, la confiance des mineurs et une excavation relativement aisée.

#### 4. LE SUIVI DE L'EXCAVATION

Les travaux de congélation ont fait l'objet d'un suivi particulièrement poussé et précis. Au total, 500,000 données ont été enregistrées et traitées sur ordinateurs puis comparées aux estimations. Le système de suivi a donné parfaitement satisfaction et les points clefs ont été levés de façon indépendante par un groupe d'experts incluant le Bureau d'Etudes, l'Entreprise Générale, l'Entreprise spécialisée, le Bureau de Contrôle.

Le contrôle en équipe a permis de prendre en compte les impératifs et les contraintes de chacun et d'aboutir à une validation partagée et une meilleure maîtrise des risques.

#### 5. LES AVANTAGES DE LA CONGELATION

Le projet de Lok Ma Chau a montré que la congélation avait de nombreuses qualités qui en font à la fois une technique d'avant-garde et lui donne la possibilité de traiter tous les points singuliers, difficiles et hors d'accès des autres techniques.

D'une part elle est invisible pour le riverain, inodore, et transparente pour le sol. Il n'y a aucun produit chimique introduit et elle n'a aucun impact sur l'agriculture, les eaux souterraines et l'air. Elle peut être envisagée dans toutes les conditions sensibles de nappes phréatiques en champ captant, d'environnement protégé ou d'accès limités en surface.

D'autre part, les travaux sont propres, la sécurité des travailleurs est grande et les dispositions sont précises. Les tolérances de 10cm sur l'excavation ont été respectées et le fini des travaux est remarquable.

De plus, bien que la préparation soit longue, les travaux eux-mêmes sont relativement rapides et lorsqu'une utilisation répétée peut être envisagée alors elle devient économique et prometteuse. Cette technique ne craint ni la profondeur, ni les pressions d'eau, ni les conditions ambiantes.

Elle est associée à une instrumentation extensive et très fine qui permet de suivre l'évolution en froid, de programmer les phases de travaux et d'alerter des incidents qui pourraient survenir aux groupes de congélation ou aux tubes eux-mêmes. Avec la facilité de communication, le suivi peut être délocaliser dans un autre continent et/ou centralisé dans les Directions Techniques des Constructeurs, des Consultants et des Clients.

*Tests on the excavated frozen ground confirmed a strength varying from 5 to 10MPa, which was considered well in line with the testing results from the laboratory.*

#### 4. INSTRUMENTATION AND MONITORING

*The works were controlled by an extensive array of instrumentation and monitoring. In addition to thermal measurement of the ground and on the running tunnel linings, monitoring was carried out to control the functioning of the ground freezing units, the flow of the brine in the piping, the temperature of the brine, the water pressures both inside the freeze envelope and outside and the deflection of the tunnel lining and the loads imposed by the ice growth (Figures 10 and 11).*

#### 5. THE ADVANTAGES OF ARTIFICIAL ROUND FREEZING

*The Sheung Shui to Chau Tau Tunnels project demonstrated that freezing is an efficient ground treatment technique to enable excavation to be carried out safely below the ground water table in difficult ground conditions.*

*By working from inside the tunnels there is no impact on the external environment, be that urban or rural and by its very nature no chemical or pollution is added to the ground, hence there is no impact to the surrounding environment, agriculture, air and water. It is a technique suited for all sensitive ground conditions where environmental constraints are strong.*

*The preparation time for ground freezing is long, but providing the works are carried out in a controlled manner the main works can be rapid. For multiple uses, such as in the case of cross passages, it can be very interesting in economical terms.*

*Ground freezing must be strongly controlled – the instrumented observational approach is ideal to achieve this. With efficient well planned instrumentation the progression of the ice front in the ground and along the boundary can be tracked and compared with design assumptions. Monitoring is also essential to give an immediate alert in the case of any loss of efficiency of the freeze, which could be catastrophic during the excavation phase. With modern communication facilities this monitoring data can be transmitted quickly and easily to allow secondary checking of the data and parameters by a remote design team or Expert. Risk assessments should be carried out prior to the works and measure put in place to address each eventuality. On this project large bulkhead doors were put in place to be activated in the event of a failure of the ice ring. This would ensure that the main tunnels were not lost in the event of a worst case scenario.*

## 6. CONCLUSIONS

Pour les plus sceptiques, une question fondamentale se posait au recours à la congélation : peut-on le faire sous les tropiques ?

Pour le Client et le Ministère de l'Environnement, plusieurs questions spécifiques se posaient : Quel impact sur l'agriculture et les primeurs ? Quel impact sur la nappe supérieure ?

Pour les Directions Techniques, quels risques de rupture des tubes de congélation, de casse des groupes de froid ou d'arrêt d'alimentation électrique ? quels impacts sur les tunnels principaux, quelles ovalisations et quels risques d'ouverture de joint entre voussoirs ?

Alors, nous pouvons répondre que la technique est adaptée à toutes les latitudes, qu'elle est maîtrisée en développement, en étanchéité et résistance et enfin en impacts sur les ouvrages adjacents à condition d'études soignées et d'une relation Etudes / Travaux directe, rigoureuse et transparente.

Le Groupe Bouygues a développé les travaux souterrains autour de l'idée de la maîtrise des risques. Il a mis l'accent sur les données d'entrée, les méthodes numériques, le suivi et la mise en place de plans de secours au cas où un défaut interviendrait. Il suit et adhère les règles techniques proposées par les assureurs anglais et publiées par l'ABI et le BTS :

*"The joint code of practice for risk management of tunnel works in the UK".*



Figure 12 – Cérémonie de Bai San à Hong Kong

## 7. LES PARTENAIRES DU PROJET

|                        |                                                       |
|------------------------|-------------------------------------------------------|
| Client                 | KCRC East Rail Extensions                             |
| Entreprise générale    | Bouygues TP / Dragages HK                             |
| Entreprise spécialisée | Intrafor / Soletanche-Bachy                           |
| Consultant             | Arup Hong Kong                                        |
| Bureau d'Etudes        | BE Bouygues TP + Expertise<br>GCG London et Hong Kong |
| Contrôle indépendant   | Atkins HK et London                                   |

## 6. CONCLUSIONS

*For the most sceptical people, the fundamental question was whether ground freezing could be carried out in tropical regions. For the concerned parties, it was whether freezing would alter the water table and the agriculture of the area.*

*From a technical / production point of view, the questions were linked with the risk of failure of freezing tubes, the risk of water seepage at the junction of the ice and tunnel lining, the impact of the ice on the completed tunnel structure and the risks associated with a stoppage of the freezing plant or power shut down.*

*Following completion of the works these questions can be answered confidently. The technique is adaptable to a wide range of conditions, it is controlled efficiently through instrumentation and has minimal impact on adjacent structures and environment. Time needs to be made available to complete a rigorous technical development which enables the works to be optimised. It is also imperative to have a close and transparent relationship between Design / Methods / Works if significant risks are to be controlled and overcome during the site works.*

**Golden Rule No.1 :** Allow sufficient time for the Design and Method to be optimised and to develop an adapted solution that is safe and controlled. The production people should participate at all stages on the development.

**Golden Rule No.2 :** Develop a balanced technical cycle between Sensitivity Studies / Soil Testing / Detailed Design / Instrumentation and Monitoring / As built Control and Back Analysis.

**Golden Rule No.3 :** Decisions concerning starting and stopping excavation must be made dispassionately on the basis of monitoring data and must not be influenced by programme or contractual restraints.

**Golden Rule No.4 :** Keep with local tradition. Always start with a Bai San ceremony before any works to keep the gods happy (Figure 18).

## 7. THE PARTNERS

|                       |                                                           |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------|
| Client                | Kowloon-Canton Railway Corporation                        |
| Main Contractor       | Bouygues TP / Dragages HK                                 |
| Specialist Contractor | Intrafor / Soletanche-Bachy                               |
| Consultant            | Arup Hong Kong                                            |
| Design Office         | BE Bouygues TP + Experts<br>Geotechnical Consulting Group |
| Independent Checker   | Atkins China                                              |