

LA CONGÉLATION DES SOLS APPLIQUÉE AUX TUNNELS CONSTRUITS AU TUNNELIER – DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS ET PERSPECTIVES

ARTIFICIAL GROUND FREEZING APPLIED TO TBM TUNNELS – RECENT DEVELOPMENTS AND PERSPECTIVES

Olivier MARTIN, Dominique MICHEL, Francis VALLON

BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

1- INTRODUCTION

Les tunnels profonds et de grandes longueurs, sous des conditions de sols difficiles et des charges d'eau importantes deviennent une réalité à laquelle la technique des tunneliers à confinement doit s'adapter. De plus les accès en surface sont très réduits, et les restrictions environnementales extrêmement fortes.

Deux difficultés majeures perturbent cette évolution :

- Les connections aux tunnels forés qui ne peuvent être construites sous confinement,
- La maintenance des éléments du bouclier au contact du terrain aux fortes profondeurs.

La congélation peut apporter des réponses à ces questions et permet d'entrevoir un développement plus important de ces tunnels extrêmes. Plots de départ et d'arrivée, inter tubes, maintenance et réparation de la machine peuvent être traités par la congélation dans des conditions économiques raisonnables et des conditions d'hygiène et sécurité acceptables pour les travailleurs.

Cet article se propose de faire le tour de la question suite à l'expérience Bouygues TP sur les travaux de congélation. Sur les 7 derniers projets étudiés à la Direction Technique, tous ont fait l'objet de proposition de congélation avec des applications variées et des conditions toujours uniques ; le champ d'application est illimité. Les essais, les études, le contrôle et le suivi sont la clef du succès de ces travaux.

1- INTRODUCTION

Long and deep tunnels in difficult grounds and under high water pressure become a reality of the modern world. Although the technology of the boring machine is ready to follow the demand, new constraints are added to limit surface access and environmental impacts.

Two major difficulties still persist:

- *The connection at the tunnel ends that cannot be constructed under confinement,*
- *The maintenance and repair of TBM heads require human access under high hyperbaric pressures.*

Artificial ground freezing may provide satisfactory answers to these questions and open a window on a more important development of these tunnels. Break-in and break-out, cross-passages, maintenance and repair of the boring machine may be treated directly from the machine via ground freezing under reasonable economical and acceptable safety conditions.

This article proposes to develop this possibility following the experience of Bouygues TP on the application of frozen ground to underground construction. The last seven underground projects studied at Bouygues TP Technical Division have all used ground freezing technique with particular applications showing its universal application. The key to success lies into a rigorous sequence of concept, testing, design, monitoring and control.

2- PROJETS RÉCENTS

Tous les projets présentés ci-dessous ont fait l'objet d'études spécifiques de construction sous congélation. Alors que cette technique réputée difficile et capricieuse était restée réservée à des entreprises spécialisées et à des travaux extrêmes, il apparaît que l'évolution des capacités de calculs des ordinateurs et l'utilisation de logiciels couplés permet de simuler de façon précise le comportement du sol gelé.

Dans ces conditions, l'intérêt de la congélation répond à:

- Des travaux difficiles (BPNL, France),
- Une recherche de protection de l'écologie (Lok Ma Chau, Hong Kong),
- La protection d'infrastructures existantes (KSL, Hong Kong),
- L'impossibilité d'accès en surface (Miami USA),
- La recherche de solutions économiques (Tunnel d'Anvers, Belgique)
- La grande profondeur (Portland USA)
- La maintenance du tunnelier (Chong Ming China)

Les qualités développées projet par projet montrent que la congélation des sols devient une technique très appropriée au creusement par tunnelier. Elle devrait encore s'étendre dans les années à venir.

2.1- Tunnels routiers de BPNL à Lyon – France - Construction 1995

Les tunnels routiers du BPNL font partie de l'autoroute périphérique autour de la ville de Lyon. Il s'agit de deux tunnels parallèles de 11m de diamètre comportant chacun deux voies de circulation. Un des inter-tubes véhicule est situé à l'interface sol /rocher sous deux bars de pression d'eau dans une configuration dangereuse pour la construction. La solution de congélation s'est imposée d'elle même par manque de solution alternative. Elle a été faite à la saumure sur une géométrie rectangulaire de 8m de hauteur par 10m de largeur afin de dégager un gabarit routier.

L'excavation s'est faite dans les conditions de sécurité requises. La congélation pour la mise en froid, l'excavation et la construction du revêtement a duré 3 ½ mois.

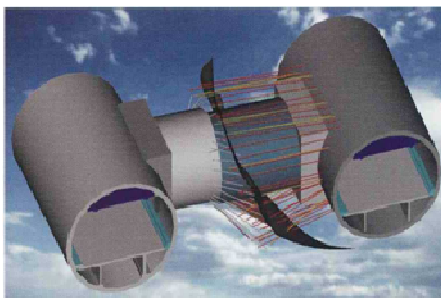


Figure 1 – Tunnel BPNL - Schéma des forages de congélation / drilling scheme

2- RECENT PROJECTS

All the projects described below have been studied at the Technical Division of Bouygues TP. Although this technique was seen as difficult and tricky in the past and was limited to specialist contractor and specific works, the improvement made in soil testing, in numerical capabilities and in monitoring are such that we can today anticipate very precisely the behaviour of the ground under freezing.

In these conditions, the interest of ground freezing can answer various queries:

- Difficult works in mixed ground (BPNL, France),
- Environmentally green technique (Lok Ma Chau Hong Kong),
- Protection to existing infrastructure (KSL project, Hong Kong),
- Prohibited surface access (Miami USA),
- Economical construction solutions (Anvers, Belgium)
- Deep construction under water (Portland USA)
- TBM maintenance (Chong Ming China)

The availability and precision of soil freezing allows the technique to complement confinement TBM tunnel construction and may answer the two questions raised early.

2.1- BPNL Road Tunnels in Lyon – France - Construction 1995

The road tunnels called BPNL are part of the highway ring around the city of Lyon (second to Paris). They are formed of two parallel 11m diameter tunnels that house each two lanes of traffic. The main road cross-passage lies under 2 bars of water pressure right at the interface between rock and soil. It represents a difficult and dangerous piece of work. The freezing solution was not challenged by any other construction technique and was therefore adopted with no discussion. It was carried out using brine and developed in an unusual rectangular geometry of 8m height by 10m width.

The excavation was carried out under severe security restriction. Freezing for excavation and construction lasted 3 ½ months.

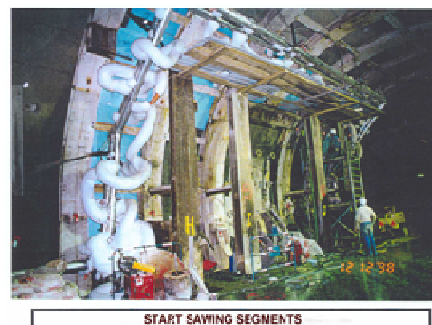


Figure 2 – BPNL Tunnel – internal view of the works / vue des travaux de congélation

2.2- Tunnels ferroviaires de Lok Ma Chau – Hong Kong – Construction 2005

Le projet de Lok Ma Chau à Hong Kong est un double tunnel ferroviaire de 8,4m de diamètre et 3500 m de longueur, relié tous les 240m par des inter-tubes piétons. Il traverse une zone écologique protégée de 1000m de longueur.

Le projet actuel est né de la volonté du ministère de l'environnement de construire des infrastructures de transport qui soient entièrement transparentes vis-à-vis de l'écologie aussi bien en phase travaux qu'en phase d'exploitation. C'est une contrainte qui a imposé aux travaux souterrains des conditions draconiennes qui sont inhabituelles :

- Pas d'installation en surface,
- Pas de puits d'accès intermédiaires,
- Pas de traitement de sols depuis la surface,
- Pas de modification de la nappe phréatique.
- Pas de sondages,
- Pas d'instrumentation profonde.



Photo 3 – Tunnel LMC - Préparation de la congélation / preparation for freezing

Ces contraintes ont imposé des travaux de congélation pour trois inter-tubes piétons entre les tunnels ferroviaires.

Il n'y a eu aucun impact sur l'écologie, l'agriculture et la vie naturelle de la surface et du sous-sol. Le niveau de la nappe n'a pas subi de variation anormale et la décongélation du terrain s'est faite de façon lente et contrôlée.

Les mesures de température sur le chantier ont été comparées aux mesures sur le modèle numérique après mise en cohérence des températures observées du fluide de congélation. La corrélation est très intéressante et montre que le phénomène thermique est bien transcrit numériquement et que les jauges sont suffisamment précises.

2.2- Lok Ma Chau railway tunnels – Hong Kong – Construction 2005

Lok Ma Chau railway project is a twin bored tunnel of 8,4m diameter and 3,5 km length. It is connected every 240m by cross-passages to allow emergency egress of public and emergency access of firemen. The tunnels cross a 1km long ecological zone that was protected by Hong Kong government for its flora and fauna.

The underground link resulted from the request of the Ministry of Environment to have zero impact at ground level whether during construction or during operation of the trains. This new constrain induces:

- No surface installation,
- No intermediate access shaft,
- No ground treatment from surface,
- No drainage or leak that could impact the water table,
- No boreholes and no deep instrumentation,



Photo 4 – LMC Tunnel - excavation of frozen ground / excavation du cross-passage

These constrains imposed the three cross-passages to be built under ground freezing.

The construction was successful and no impact was recorded to the ecology, the agriculture, and the natural life at and below surface. The water table did not suffer any abnormal variation and the return to normal temperature was slow and under control.

The measurements made on site were compared to the numerical models after correction of the real brine temperature. The correlation is excellent and demonstrates that thermal phenomena is well translated into the finite element codes and thermal sensors have a fair precision.

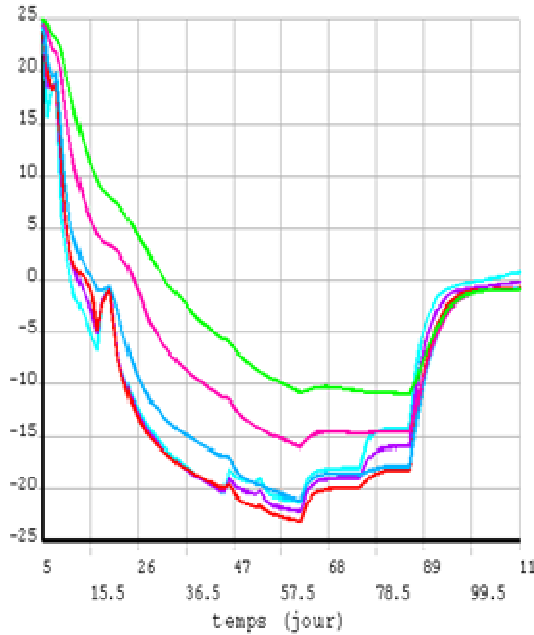


Figure 5 – Tunnel LMC – simulation des températures aux points de mesure / numerical simulations

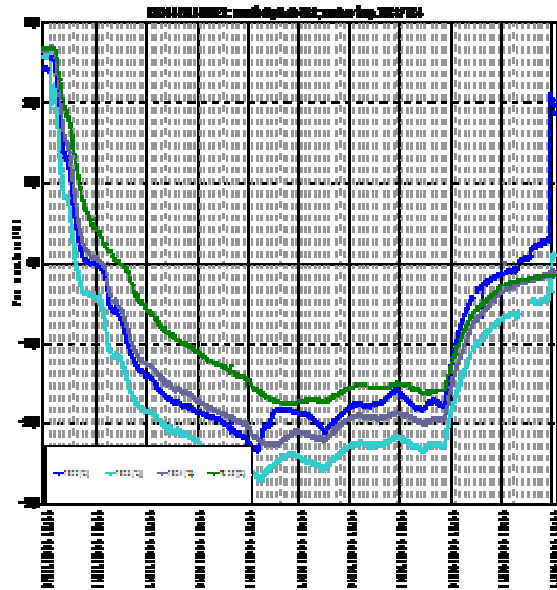


Figure 6 – LMC Tunnel – measurement of temperatures at control points / mesures in situ

2.3- Emissaire de Portland – USA – Etudes 2005

Le projet de Portland CSO est un émissaire profond de rejet d'eau usée de 9km de longueur dans la ville de Portland sur la cote ouest américaine. Il est situé entre 25 et 45m sous la surface dans des horizons de sables grossiers très perméables.

Le projet comprend un tunnel de 6,7m de diamètre et 8 puits circulaires de 10 à 17m de diamètre, qui servent de puits d'entrée, puits de sortie ou puits d'entrée / sortie pour les machines. La solution de congélation est pertinente puisqu'elle permet à la fois d'établir l'étanchéité nécessaire aux extrémités de projet et qu'elle s'effectue à partir de puits verticaux suffisants pour réaliser les forages de congélation.

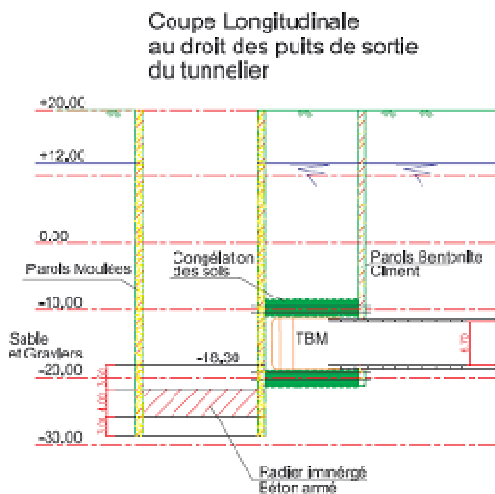


Photo 7 - Portland CSO – puits et break-out en congélation

2.3- Portland main sewer – USA – Design 2005

The Portland CSO project is a 9km-long 45m-deep sewer that collects and rejects used water into the ocean. The tunnel level varies between 25 and 45m below the sea level and crosses highly permeable gravel layers.

The project includes a 6,7m diameter tunnel and 8 circular shafts with diameter varying from 10 to 17m. They split the tunnel in 9 construction areas that allows independent attack front by TBM machines in order to validate the schedule. Consequently they serve alternatively as entry or exit shaft for the TBM. Ground freezing is pertinent in these conditions as it allows 100% water tightness and can be developed from the vertical shafts.

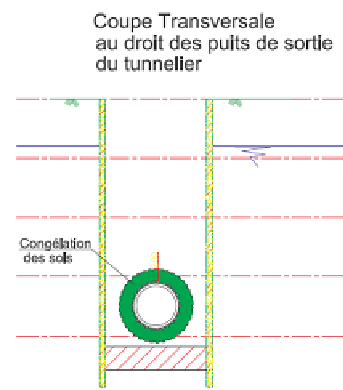


Photo 8 - Portland CSO – exit shaft and break-out under freezing

2.4- Tunnels routiers Chong Ming – China – Construction 2006-2008

Les tunnels de Chong Ming à Shanghai permettent de traverser la rivière Yang-tsé par une autoroute 2 x 3 voies. Ils ont une longueur de 8,1 km pour un diamètre de 15,45m. C'est le plus grand tunnel au monde jamais construit à l'aide d'un bouclier.



Photo 9 – Tunnel Chong Ming – Bouclier du Tunnelier et Tunnel en construction

La rivière Yang-tsé est difficilement franchissable, c'est l'accès principal au port de Shanghai et elle draine et dépose toutes les alluvions qu'elle a charriées le long de son cours. Les sols sont de faible compacité et demandent des techniques de construction adaptées : Tunnelier à pression de boue et congélation sont les deux techniques privilégiées. La congélation étant prévue pour la construction des inter-tubes et des massifs d'arrêt et de maintenance du tunnelier. En effet, sur la longueur du tunnel il est indispensable d'avoir un arrêt pour effectuer le contrôle et la maintenance des outils de coupe et des brosses du joint de queue du bouclier.

La congélation des inter-tubes est classique et le diamètre des tunnels principaux est favorable au positionnement des machines pour le forage des tubes de congélation.

En l'absence de puits intermédiaire, une solution originale par congélation a été imaginée pour la maintenance des brosses à savoir une opération de congélation réalisée par des forages radiaux au travers des voussoirs de tunnel. Elle permet de créer un anneau de sol congelé qui réalise l'étanchéité entre la jupe et les voussoirs et autorise le démontage des brosses d'injection. (procédé breveté par Bouygues TP).

2.4- Road tunnels in Chong Ming – China – Construction 2006-2008

The Chong Ming tunnels are located near Shanghai. They allow the crossing of the famous and impetuous Yang-tsé river by a 2x3 lanes freeway. The tunnels have a length of 8,1 km and are built with a 15,45m diameter TBM machine. This is today the largest TBM ever built in the world.



Photo 10 – Chong Mingtunnel – TBM cutter head and Tunnel under construction

The Yang-tsé (yellow river) is large and deep and forms the main access to Shanghai harbour. Located at the mouth of the river where most alluviums are deposited, the tunnels suffer from loose sand and silt layer on a significant depth. They require adapted construction techniques. Slurry TBM and ground freezing are the two main techniques of the project. Freezing was anticipated for all cross-passage construction and all repair and maintenance blocs. Indeed, the length of the tunnel is such that an intermediate stop was necessary to warrant the behavior of the cutting tools and the water-tight brushes and possibly the repair or complete change.

Cross-passage freezing is now classic and the large diameter of the main tunnels is favourable to the positioning of the drilling rig.

In the absence of intermediate maintenance shaft, an original freezing solution was developed in-house to access, review and repair the water-tight brushes located at the end of the shield. It was carried out thanks to radial freezers through the segments and allows the formation of a water-tight and resistant annulus of frozen ground at the interface between the shield and the segmental lining. (This solution was patented by Bouygues TP).

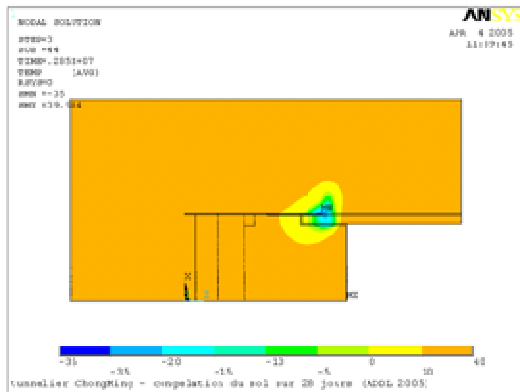


Figure 11 – Tunnel Chong Ming - Modélisation de la congélation vis-à-vis du tunnelier et détails autour du forage

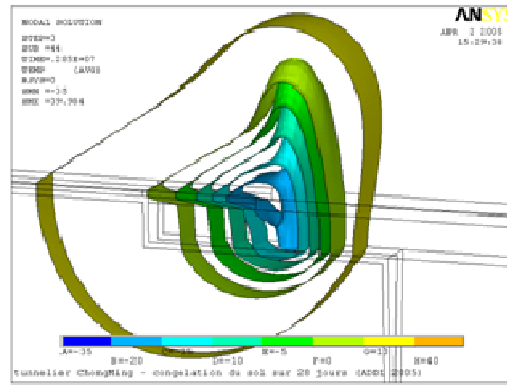


Figure 12 – Chong Ming tunnel – Numerical simulation of freezing and details around the freezer.

2.5- Tunnels ferroviaires Kowloon Southern Link Hong Kong – Etudes 2005

Les tunnels ferroviaires du lot KSL201 (diamètre 8,40m) passent au dessus de ligne de métro MTRC (diamètre 5,30m) juste avant d'accéder à la station Tsim Sha Tsui. La distance entre l'extrados des deux tunnels est de 2,5m et a fait craindre une perturbation des tunnels du MTRC par les travaux nouveaux. Cette ligne étant la desserte majeure entre l'île de Hong Kong et la péninsule de Kowloon, elle est traversée par des trains toutes les 2 minutes. Il était donc hors de question de choisir une solution qui pouvait faire porter un risque d'interruption ou d'accident.

L'étude a comparé 4 solutions de traversée :

- Option 1 - Excavation à ciel ouvert (proposée par le consultant),
- Option 2 - Pipe jacking et injection complémentaire,
- Option 3 - Congélation des sols et excavation traditionnelle,
- Option 4 - Traversée au tunnelier.

Le tableau de comparaison est montré ci-dessous :

	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Construction KSL	(4)	(3)	(1)	(1)
Impact Métro	(4)	(4)	(1)	(2)
pact réseaux	(1)	(2)	(2)	(1)
Délai de construction	(3)	(2)	(2)	(2)
TOTAL	12	11	6	6

Critères : (1) très bon, (2) bon, (3) mauvais, (4) interdit.

Deux solutions se sont détachées des autres : la congélation et la traversée au tunnelier. Les deux autres ont été exclues car trop dangereuses vis-à-vis des travaux et de l'impact sur le tunnel existant.

L'avantage de la congélation est lié d'une part aux travaux de préparation très peu perturbants vis-à-vis du tunnel existant et au développement de la congélation qui englobe le terrain entre les deux tunnels sans pénétrer dans le tunnel existant.

2.5- Kowloon Southern Link railway tunnels Hong Kong – Design 2005

The railway tunnels forming contract KSL201 have an outer diameter of 8,40m. Near Tsi Sha Tsui station, they pass above the highly loaded MTRC metro line connecting Hong Kong Island to Kowloon. MTR tunnels have a diameter of 5,30m and a clear distance of 2,5m with the projected KSL tunnels. The old tunnel concept and the close tunnel construction have raised concerns on a potential impact during construction. As this line is the main access to the island, trains are running at an interval of 2 minutes. It was felt impossible to choose a technical solution that could derail trains, stop or delay their operation.

The risk analysis reviewed 4 solutions:

- Option 1 – Open air excavation (conforming solution),
- Option 2 – Ground treatment and Pipe jacking,
- Option 3 – Ground freezing and atmospheric excavation,
- Option 4 – TBM crossing

The result of the evaluation is shown below:

	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
KSL Construction	(4)	(3)	(1)	(1)
MTRC Impact	(4)	(4)	(1)	(2)
Utility impact	(1)	(2)	(2)	(1)
Construction time	(3)	(2)	(2)	(2)
TOTAL	12	11	6	6

(grades = (1) very good, (2) good, (3) bad, (4) forbidden

Two solutions lead the comparison: ground freezing and TBM construction. The other two were excluded as too dangerous for the works or the existing tunnels.

The main advantage of the freezing works is linked with preparatory works that have no impact at all to the surroundings and the development of frozen ground that addresses the ground between the two tunnels without entering the existing one (and therefore without impacting the operation of trains).

La demi-section gauche représente le tunnel en zone courante et la demi-section droite représente le tunnel au droit du croisement avec le tunnel MTRC existant.

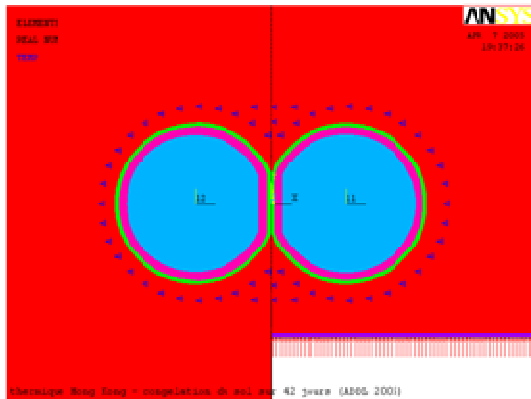


Figure 13 – Tunnel KSL - modèle de calculs thermiques et résultats après creusement du tunnel en traditionnel hors croisement et au croisement

The simulation is symmetrical and represents the KSL tunnel outside the MTR tunnel zone in the left half and the KSL tunnels above the MTR tunnels in the right hand side half of the model.

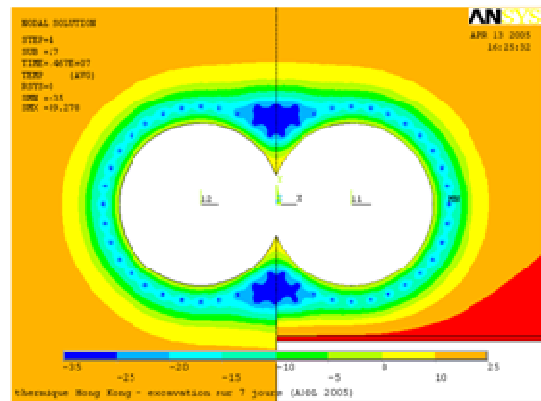


Figure 14 – KSL tunnel – thermal simulation model and results after excavation

2.6- Tunnels routiers de Miami – USA – Etudes 2007

Le projet des tunnels routiers de Miami proposent de relier l'autoroute I395 au centre Portuaire de la ville. Il permet alors de faciliter l'accès et de réduire le transit des camions dans le centre ville.

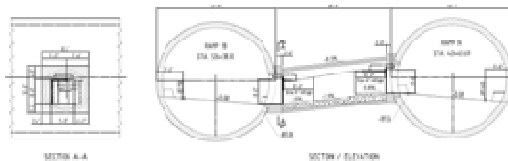


Figure 15 – Tunnel Miami - Schéma des inter-tubes dans le projet / typical cross-passage

Les deux tunnels de 13m de diamètre passent sous le chenal d'accès au port en dégagant un gabarit de navigation de 13m et avec une couverture minimum de 5m. Ils sont reliés par des inter-tubes piétons de 4m de diamètre distants de 240m. Trois inter-tubes sont sous le chenal de navigation avec impossibilité de positionner quelque navire que ce soit dans le chenal. Ils sont construits sous congélation. Leur longueur varie entre 4 et 10m. Ils sont représentés sur le schéma suivant.

Les tunnels et inter-tubes sont creusés dans des formations de sables coralliens d'une perméabilité comprise entre 10-2 et 100 m/sec. Seule la congélation des sols permet de creuser les inter-tubes en sécurité. L'étude a montré l'intérêt économique et technique de la solution ainsi que son efficacité dans les grands tunnels routiers.

Pour la réalisation, la congélation à la saumure et à l'azote liquide seront comparées afin de choisir la solution la mieux adaptée en fonction de l'impact planning et l'impact économique.

2.6- Miami road tunnels – USA – Etudes 2007

The Port of Miami road tunnels add a direct link from the main I395 freeway to the port of Miami. It allows to ban the circulation of trucks along the streets of the city and to increase the Port activity and connectivity.

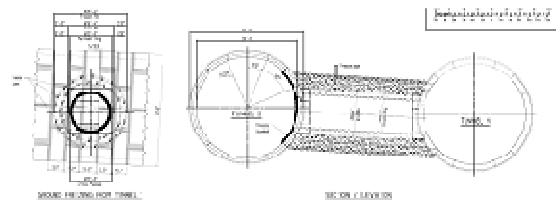


Figure 16 – Miami Tunnel – Freezing details / details de congélation

The two 13m diameter tunnels cross the main access canal to the harbor. The canals have a clear depth of 13m and the tunnel a clear cover of 5m to the bottom of the canal. They are critical under construction in term of buoyancy and water inflow. The tunnels are linked together by 4m high emergency cross-passage every 240m. Three cross-passages are below the canal with the absolute impossibility to position any barge on top of them. Consequently, they are built under freezing. They are shown below.

The tunnels and cross-passages are built in coral sands with a permeability varying between 10-2 and 100 m/sec. Only the soil freezing technique allows their safe construction. The study has shown the economical interest of freezing and its efficiency for large road tunnels.

During construction, the comparison will be made between brine freezing and liquid nitrogen freezing to assess the potential economical and schedule impacts.

Les calculs ont été faits à l'interface entre calcaire de Miami et sables coralliens qui ont des comportements différents. Le résultat thermique est quasi insensible à ces écarts de même que le comportement mécanique sous congélation.

The study was carried out at the interface between Miami Limestone and coral sands which have different mechanical behaviour. The thermal results are similar for both and we expect the mechanical behaviours under freezing to be also similar.

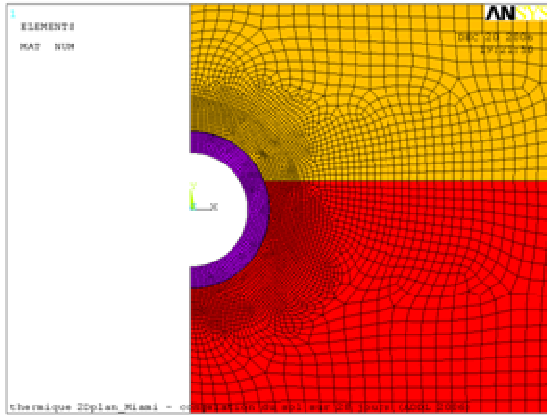


Photo 17 – Tunnel Miami - Modèle de calculs et calculs 2D de congélation des CP

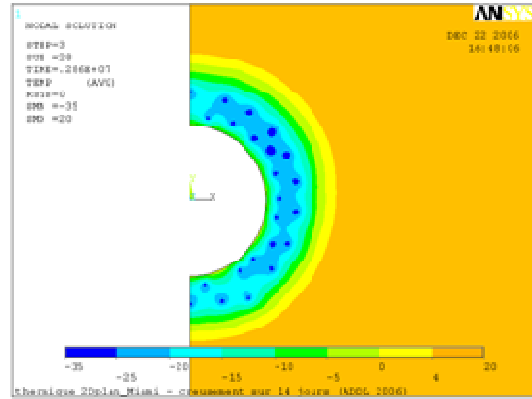


Photo 18 – Miami Tunnel – simulation model and 2D results of the thermal fields

2.7- Tunnels d'Anvers – Belgique - Etudes 2007

Les tunnels d'Anvers permettent le passage de la ligne TGV à proximité de la ville d'Anvers. Les tunnels sont reliés par des inter-tubes d'une longueur de 8m. Afin de faciliter le programme de construction, la congélation à l'azote et à la saumure ont été comparées en termes de forage, de durée de congélation, d'excavation et de coût. Les résultats sont très intéressants et montre que la congélation à l'azote liquide a des avantages indéniables.

2.7- Anvers rail Tunnels – Belgique - Etudes 2007

The Anvers rail tunnels take the European High Speed Line to Belgium on the way to Holland and northern Europe. The tunnels are linked by 8m long cross-passages spaced at every 240m. In order to facilitate the construction program, Liquid Nitrogen and brine were compared in term of drilling, duration and cost. It shows that liquid nitrogen may have interesting advantages that could not be discounted. Thermal properties of soils are much more favourable between -100° and -200° than they are between -5° et -15° . As such, soil freezing appear to be rapid, high tech and clock-work precision. It is not sensitive to the type of soil and to its density (the temperature are coming close to the zero Kelvin limit and energy is dropping).

Les caractéristiques thermiques entre -100° et -200° sont beaucoup plus favorables qu'aux températures usuelles entre -5° et -15° . De ce fait, la congélation apparaît comme très rapide, chirurgicale et limitée dans l'espace. De plus, elle est beaucoup moins sensible aux types de sols (l'approche du zéro Kelvin se fait ici fortement sentir).

In two days, the frozen annulus is closed and after four to six days, it is sufficiently strong to resist external loads. As a comparison, brine freezing requested between 5 weeks (for 33 freezers) to 8 weeks (with 22 freezers) to reach a similar level of strength.

En 2 jours, l'anneau est fermé et entre 4 et 6 jours il est suffisamment résistant pour démarrer l'excavation. En comparaison, la congélation à la saumure demande 8 semaines avec 22 congélateurs (distance 1,1m) et 5 semaines avec un schéma à 33 congélateurs.

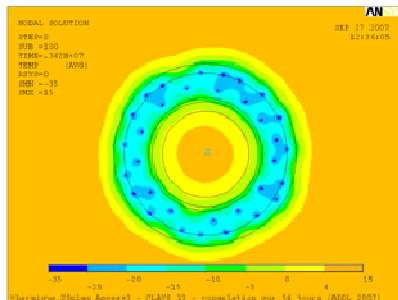


Figure 19 - Tunnel Anvers - Congélation à la saumure après 35 jours et à l'azote liquide après 6 jours

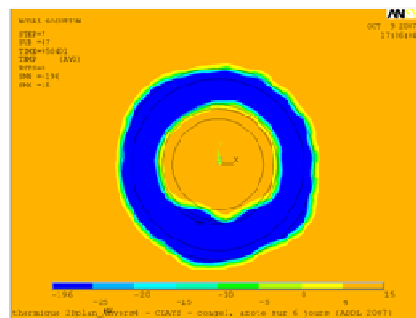


Figure 20 – Anvers Tunnel – Brine freezing after 7 weeks and liquid nitrogen freezing after 6 days.

3- DÉVELOPPEMENTS ACTUELS

Le groupe Bouygues Travaux Publics développe des techniques de congélation appliquées aux tunnels à grande profondeur et sous forte pression d'eau. L'intérêt étant de proposer aux clients nationaux et internationaux des solutions techniques satisfaisantes pour creuser dans des situations extrêmes n'autorisant pas d'accès en surface, (bras de mer, zone écologique, zone urbaine, sols à très faibles caractéristiques). Ces développements sont faits sous budgets internes de R&D et sont protégés par des brevets internationaux.

Quatre éléments sont particulièrement importants dans ces considérations :

- Les extrémités de tunnels (voir projet Portland),
- La maintenance du tunnelier (voir projet Chong Ming),
- Les terrains perméables proches de la mer (voir Miami),
- La congélation à l'azote liquide (voir tunnel d'Anvers).

Les atouts de la congélation mis en avant sont essentiels dans ces considérations :

- Sécurité des ouvriers et maîtrise des risques sous fortes charge d'eau
- Contrôle permanent du circuit de congélation et de l'état du terrain,
- Economie et fiabilité des installations de froid,
- Impact nul sur l'environnement.

3.1- Break-in et break-out

Les dispositions de congélation sont classiques et ne demandent pas de développement particulier. L'étude R&D se porte sur l'impact du fonctionnement du tunnelier sur le sol gelé, chaleur résiduelle, fonte du sol congelé, liquéfaction du sol dans la frange en décongélation, impact du temps de creusement en break-in et break-out. Les études de simulation fine sont prévues en 2008 avec application projet en 2009/2010.

3.2- Maintenance du tunnelier

Les dispositions de congélation sont particulières et étudiées avec la machine. Bouygues TP utilise ici ses développements de machines et les fonctionnalités qu'il impose au fabricant. Le principe s'appuie sur une machine métallique très conductrice, et sur un réseau de congélateur judicieusement positionné en contact avec le corps du tunnelier.

3- PRESENT DEVELOPMENTS

Bouygues Travaux Publics is presently developing an R&D program to investigate the possibilities of soil freezing for deep tunnel under large water pressure.

The interest of these developments is to be in a position to propose to international developers and clients solutions that are practical and safe. It then allows us to approach the extreme situations with no surface access, (sea and estuaries, eco-protected zones, urban areas, very weak soils). They are financed via internal R&D budgets and are protected via international licenses.

Four elements are of considerable interest:

- *The tunnel ends and connections (see CSO Portland),*
- *The maintenance and repair of TBM (see Chong Ming),*
- *The high permeability soil bands below sea level (see Miami),*
- *The use of liquid nitrogen for fast freezing (see Anvers).*

The advantages of the ASF technique are highly recognised as determinant:

- *Safety of workers and control of high water pressure risks,*
- *Live monitoring and control of the freezing plant and circuit,*
- *Economy and reliability of the freezing plant,*
- *Zero impact on the environment.*

3.1- Break-in and break-out for TBM bored tunnels

The provisions are classical and do not require any particular elements or studies. The R&D study analyses the impact of the TBM seen as a heating source and potentially damaging for the frozen soil. It will review residual heat, melting of frozen ground, liquefaction of soil near melting point, impact of boring speed on the melting process. The studies are ongoing and should be complete in 2008 with a practical application in 2009/2010.

3.2- Maintenance of the TBM machine

The provisions for freezing are specific and need to be integrated with the head and shield design. Bouygues TP benefits here on its past development of TBMs and its analysis of functionality and specifications of the TBM set to the supplier. The principle is to use the conductive steel mass of the machine and to develop an adapted piping network on the inside body of the head and shield.

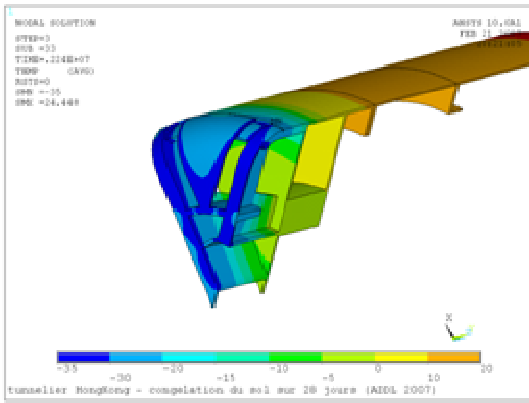


Figure 21 – Maintenance tunnelier - Carte de température sur le tunnelier et dans le sol 500mm à l'avant du tunnelier

Les études portent sur l'intégration de la congélation dans le tunnelier, le délai d'accès en pression atmosphérique dans la chambre et une maintenance possible des corps critiques du tunnelier. La fin des études est prévue en 2008, la première expérimentation en 2009 avec possibilité de chantier en 2010.

3.3- Utilisation d'azote liquide

La circulation de liquides et gaz à basses températures (-196° température de fusion de l'azote liquide) pose des problèmes d'hygiène et sécurité particuliers et sévères. Ils demandent une réponse adaptée de façon à annuler leur impact pratique sur les ouvriers du chantier.

Localisation et protection des équipements, détection d'anomalie, conditions de travail en proximité et protection des ouvriers sont étudiés en parallèle aux aspects thermiques de la mise en froid. Il est intéressant de noter la proximité au zéro kelvin et l'impact sur conductivité (multipliée par 5) et chaleur massique (divisé par 3). Le traitement devient très précis et chirurgical, en conséquence le transfert de frigorie est limité et économique.

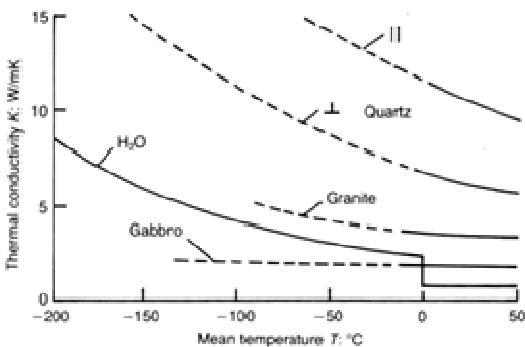


Figure 23- Evolutions de la conductivité thermique (Frivit 1980) à températures cryogéniques / Thermal conductivity at cryogenic temperatures

Les études ont été terminées en 2007 avec application projet en 2008.

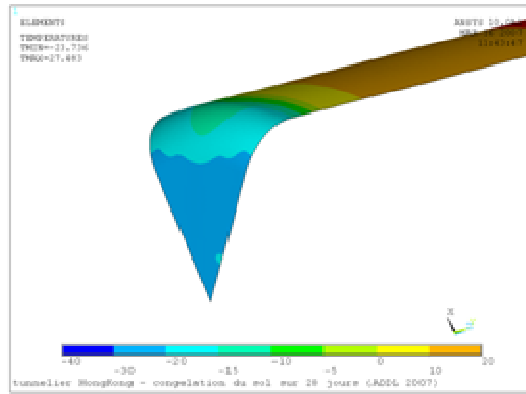


Figure 22 – TBM Maintenance – temperature map in the steel body (left) and in a cut 500mm ahead of the machine inside the soil.

The studies address the integration of the piping network inside the TBM, the duration to reach acceptable thermal field, and the protection to sensitive moving parts of it. The end of the study is anticipated for 2008, with a first experimentation in 2009 and a possible site in 2010.

3.3- Use of liquid nitrogen

The use of liquid nitrogen for soil freezing is extremely efficient due to the low temperature of fusion (-196°) of nitrogen but it brings the question of health and safety related to the workers. It requires an adapted answer to control and minimize the impact on the site.

Localization and protection of the freezing equipment, detection and protection of leak, working conditions in proximity to the cryogenic temperature and personal protection to the workers are studied together and in parallel to the technical development of the frigories in the soil media. It is interesting to note the proximity to the zero Kelvin point and its impact on conductivity (factored by 5) and heat capacity (divided by 3). The treatment becomes precise and fine like in surgery.

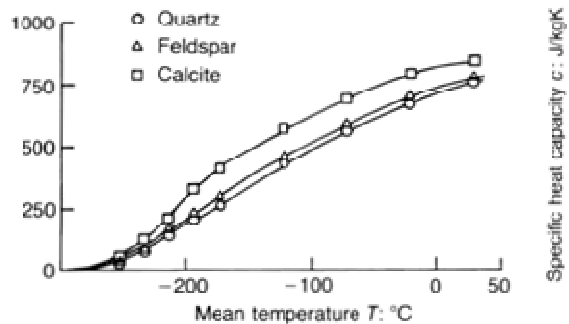


Figure 24- Evolutions of heat mass (Konrad et Morgenstern 1980) at cryogenic temperatures. Chaleur massique à basses températures

The studies are completed in 2007 and the application ready for 2008.

4- PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS

La congélation est une technique sûre et précise, maîtrisée dans le temps et l'espace. C'est une technique moderne qui s'adapte parfaitement à la construction au tunnelier. Son champ d'application est vaste et limité uniquement par la mise en place des congélateurs et l'alimentation du liquide de refroidissement.

Elle permet d'aborder des problèmes nouveaux de construction à grande profondeur sous forte pression d'eau. Atteindre 100m est aujourd'hui faisable, ce qui permet d'envisager des traversées jusque là interdites par les analyses de risque et les compagnies d'assurance.

Ce pas technologique est possible grâce à l'utilisation inédite de la congélation pour la maintenance, la réparation et le traitement d'incidents machine sur le tunnelier. Les études menées en R&D par le Groupe Bouygues Travaux Publics montrent des possibilités pertinentes et économiques.

Le développement des possibilités de simulation numérique associé à la très bonne fiabilité des mesures thermiques en font une technique sûre et neutre pour l'environnement. L'expérience, la compétence et la précision des équipes techniques de Bureau d'Etudes et de Chantier garantissent d'envisager sereinement le passage aux grandes profondeurs. .

4- PERSPECTIVES AND CONCLUSIONS

Ground freezing is a construction technique that is safe and precise, that is easily controlled in space and in time. With the advance in computer calculations, It complements particularly well the tunnel construction via confinement TBM. Its application field is large and only limited to the possibilities offered by drilling techniques. The speed of freezing can be boosted by the application of liquid nitrogen.

It allows us to study new projects, long stretch, deep crossing and adverse soil conditions. Tunnelling at 100m depth is today feasible, and it opens the door to extreme crossing that were up to now prohibited by the risk analysis and the insurance companies.

This rupture innovation is possible thanks to the unique use of ground freezing for maintenance and repair of TBM. The studies developed under an in-house R&D program provide pertinent and economical answers.

The 3D numerical simulations, completed by standardized soil testing and adequate monitoring proved this construction technique to be safe and neutral to the environment. The experience gained through various projects, the precision of the Design team and the rigour of the construction team warrant going to the great depth for infrastructure or energy projects.