

# Congrès mondial des tunnels, Helsinki, mai 2011

Résumés des communications présentées par l'AFTES

## World Congress on tunnels, Helsinki, May 2011

Summaries of papers presented by AFTES



Du 20 au 26 mai dernier, l'Association Finlandaise des Tunnels et l'Association Finlandaise des Ingénieurs Civils ont accueilli à Helsinki le Congrès International des Tunnels 2011 de l'AITES sur le thème "Espaces souterrains au service d'une société durable" ainsi que la 37ème Assemblée Générale de l'AITES qui se sont tenus tous deux au Finlandia Hall Conference & Exhibition Center. Nous publions ci-après les résumés des 13 communications présentées par la délégation française. Ceux de nos lecteurs qui, au vu des résumés, seraient intéressés par le texte complet d'une ou plusieurs de ces contributions, peuvent en faire la demande auprès du Secrétariat de l'AFTES.

On May 20th to 26th, the Finnish Tunneling Association together with the Finnish Association of Civil Engineers welcomed in Helsinki the ITA 2011 World Tunnel Congress "Underground spaces in the service of a sustainable society" and the 37th ITA General Assembly, both held at the Finlandia Hall Conference & Exhibition Center. We hereinafter publish the summaries of the 13 technical papers presented by the French delegation. Some of these papers have been already published in *Tunnels & Espace Souterrain*, others may be later on. Readers who, after reading the following summaries, would be interested by the full texts of one or several of these contributions are kindly requested to submit their application to the AFTES secretariat.

### 1 - La nouvelle liaison ferroviaire Lyon-Turin. Excavation d'un tunnel long et profond dans des roches susceptibles d'éclatement

#### *Lyon-Turin new railway link. Excavation of a long deep tunnel under rockburst conditions*

Lorenzo Brino, LTF, Italy - Nathalie Monin, LTF, France - Angelo Farinetti, LTF, Italy

Le projet de la nouvelle ligne ferroviaire entre Turin (Italie) et Lyon (France) passe sous le Massif d'Ambin (Alpes occidentales) sous une couverture de 2500 m. Une des phases les plus importantes du projet consiste à identifier les paramètres géotechniques de la masse rocheuse, à savoir le «gneiss d'Ambin».

Ces roches ont de bonnes caractéristiques géomécaniques, mais elles ont aussi un comportement anisotrope et des conditions de contraintes élevées avant excavation, susceptibles de créer des phénomènes d'éclatement.

En raison de la profondeur élevée du tunnel et compte tenu de la difficulté d'accès au site (zone de montagne), les reconnaissances géotechniques ont été limitées: 3 sondages de 500 à 1600 mètres de longueur sur le côté ouest de la zone ont

permis de définir la nature géomécanique de la roche ainsi que les conditions de contraintes in situ.

Après cette campagne de sondages, afin de compléter les études, un modèle géotechnique a été développé. Ce modèle, qui prend en considération l'excès de contrainte lors de l'excavation puis la libération imprévisible d'énergie, considère le mécanisme de rupture par rapport à l'indice de fragilité et à la résistance à la compression uniaxiale (UCS) afin de définir un Indice de Dommages pour chaque type de roche et de pouvoir ainsi établir un classement des différentes zones en fonction du niveau de risque.

The new railway project between Turin (Italy) and Lyon (France) will underpass the Ambin Massif (Occidental Alps) with an overburden of 2500 m.

One of the most important design phase is to identify the geotechnical parameters of the rock mass, i.e. "gneiss of Ambin".

These rocks have good geomechanical characteristics, but they have also an anisotropic behaviour and high stress conditions before the excavation, and could induce rockburst phenomena.

Due to the high tunnel depth and considering the difficult access to the site (mountain area), the direct geotechnical investigations were limited: 3 boreholes from 500 m to 1600 m on the west side of this area allowed definition of the geomechanic situation and the in situ stress conditions.

In order to complete the studies after the investigation phase a geotechnical model was developed.

The geotechnical model regarding the tensional energy overstock during the excavation and the consequent unannounced energy release consider the failure mechanism (fragile) combined to the Index of fragility and uniaxial compressive strength (UCS) in order to define the Damage Index for each rock type and classify the zones related with the risk level.

**2 - Conception d'une structure compacte de liaison puits-tunnel adoptée pour le Métro du Caire NE3. Projet et utilisation de méthodes numériques avancées**

*A compact design for shaft-tunnel junction adopted for Cairo metro NE 3. Design aspects and use of advanced numerical methods*

Sylvie Giuliani-Leonardi, VINCI Construction, France - Olivier J. Gastebled, Tractebel Engineering, France - Samy Mahdi, Tractebel Engineering, France

La conception des liaisons puits-tunnel sur le métro du Caire a évolué au fil du temps. Les conditions géologiques du Caire sont difficiles, avec des couches alternées de sable et d'argile et la présence d'une nappe phréatique. Au début, pour la ligne 2, la jonction entre les puits rectangulaires et le tunnel foré a été réalisée par l'excavation de rameaux de liaison dans un sol artificiellement congelé.

Plus tard, pour la nouvelle ligne 3, la congélation fut remplacée par une technique d'amélioration du sol utilisant un béton plastique. Plus récemment, un nouveau concept a été introduit, avec lequel aucune amélioration de sol ni aucune galerie de liaison ne sont nécessaires. Le principe consiste à ce que le tunnelier pénètre partiellement dans un puits circulaire non excavé réalisé en paroi moulée. Ce puits peut ensuite être excavé en plusieurs étapes, permettant la construction de la partie supérieure puis de la partie inférieure d'une structure en béton armé destinée à renforcer l'ouverture créée par le tunnelier dans la paroi moulée du puits. Bien que cette technique permette de réaliser des économies par rapport au coût d'un traitement de sol et à la durée de construction d'un rameau de liaison, elle exige cependant une étude spécifique détaillée des armatures de la paroi moulée et du dimensionnement des reprises de cisaillement entre la paroi du puits, le revêtement du tunnel et les éléments en béton de l'ouverture. Un modèle numérique 3D perfectionné est ainsi utilisé pour évaluer les forces appliquées aux structures et sur lesquelles est basé le projet détaillé. La géométrie complexe de la liaison combinée avec le comportement non-linéaire du sol et des joints entre panneaux ainsi que l'incidence de la séquence de construction ont conduit à adopter des méthodes numériques avancées. Ce n'est que récemment que des logiciels d'éléments finis de capacité suffisante et conviviaux sont disponibles pour modéliser une telle configuration 3D de façon réaliste et dans un délai compatible avec les exigences du projet. Cet exemple illustre comment les progrès en méthodes de construction peuvent être stimulés grâce aux améliorations des outils d'analyse.

The design of shaft-tunnel junctions on the Greater Cairo metro system has evolved over time. The geological conditions in Cairo are challenging, with

alternated layers of sands and clays and the existence of a water table. Initially for former metro line 2, the junction between rectangular shafts and the bored tunnel was achieved by excavating the cross-passages in artificially frozen ground.

Later for the new line 3, the technique of artificial freezing was replaced by a ground improvement approach using plastic concrete. More recently, a new concept was introduced whereby no ground improvement and no connecting galleries are necessary. The principle lies in driving the TBM to partially intercept an unexcavated circular slurry wall. The shaft can then be excavated in several stages, allowing for the construction of the upper part and the lower part of a reinforced concrete portal aimed at strengthening the opening created by the TBM in the shaft slurry wall. While this approach entails savings in both the cost of soil treatment, and in the construction time of the cross-passage, it requires adequate detailing of the reinforcement in the slurry wall panels and the dimensioning of the shear connectors between the panels of the shaft, the segmental lining of the tunnel and the concrete elements of the portal. Advanced 3D numerical modelling is thus used to assess structural forces on which the detailing is based. The complex geometry of the junction associated with the non-linear behaviour of the ground and of the inter-panel joints as well as the impact of the construction sequence led to adopt advanced numerical methods. It is only recently that finite element software with sufficient capabilities and user-friendliness are available to model such a 3D configuration in a realistic way and within a timeframe compatible with project requirements. This example illustrates how advances in construction methods can be stimulated through improvements in the analytical tools.

**3 - Développement de projets de systèmes de transports en commun pour le Grand Paris**

*Development of the mass transit systems projects for the greater Paris*

Jean Paul Godard, French Tunnelling and Underground Space Association (AFTES) France - Alain Balan, President French Tunnelling and Underground Space Association (AFTES) France

La plupart des documents présentés dans les conférences sur les constructions souterraines concernent la conception détaillée et la mise en œuvre de la construction. Il y en a très peu qui se rapportent aux phases préliminaires des projets, qui sont souvent pleins d'informations sur le choix entre des solutions en sous-sol ou en surface.

C'est pourquoi l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES) souhaite présenter les phases initiales des projets de transport en commun de la région parisienne et les problèmes de choix qui se posent à ce stade. Au Congrès mondial des tunnels de Vancouver (2010), la première véritable présentation de ces projets a été faite, ainsi que les principales options proposées dont certaines soulevèrent des débats animés.

Après avoir résumé la teneur des trois projets principaux (réseau de transport public du Grand Paris, «Arc Express» et l'extension de la ligne E du RER vers l'Ouest), la procédure du «débat public», à laquelle ils ont été soumis au troisième trimestre de 2010, est exposée. Cette consultation devrait, en particulier, aider à régler les problèmes d'interface entre les projets du Réseau de Transports publics du Grand Paris et "Arc Express" et, si possible, à arbitrer entre les choix stratégiques qui les sous-tendent.

Enfin, des informations sont données sur l'action que l'AFTES entend mener pour que ces projets soient l'occasion d'une utilisation rationnelle de l'espace souterrain.

Most papers presented at conferences on underground constructions concern the detailed design and implementation of the construction. There are very few that refer to the preliminary phases of projects, which are often full of information on the choice between below-ground and above-ground solutions.

This is why the French Tunnelling and Underground Space Association (AFTES) wishes to present the initial phases of the Paris region public transport projects and the problems of the choices that arise at that stage.

At the World Tunnel Congress in Vancouver (2010), the very first presentation of these projects was made, together with the main options that arose, some of them were subject to lively debates.

Having first summarised the composition of the three main projects (Greater Paris Public Transportation Network, "Arc Express" and extension of RER line E towards the West), the procedure of the "Public Debate", to which they were subjected in the third quarter of 2010, is set out. This consultation should, in particular, help to settle the problems of the interfaces between the Greater Paris Public Transportation Network projects and "Arc Express" and, if possible, to arbitrate between the strategic choices that underlie them.

Finally, information is given concerning the action that AFTES intends to ensure that these projects are the occasion of a rational use of underground space.

#### 4 - Injections destinées à réduire la perméabilité de roches tendres ; attentes en fonction de l'expérience acquise sur plusieurs projets importants

##### *Grouting to reduce the permeability of weak rocks, expectations versus experience from a number of major projects*

David Hartwell, Groundwater Management Consultant, U.K. - Elena Chirioti, Systra, France - Peter Jackson, Cowi, Denmark

Le contrôle de la pression interstitielle et des arrivées d'eaux souterraines est une exigence fondamentale pour les tunnels et les excavations profondes construites sous la nappe phréatique. Les injections sont couramment utilisées pour réduire la perméabilité, mais la perméabilité mesurée après injections n'est souvent pas à la hauteur des attentes. Cet article vise à répondre à ces questions et donne des indications sur les réductions probables de perméabilité que l'on peut atteindre dans des roches tendres, basées sur un certain nombre d'études de cas, parmi lesquels le métro de Copenhague et le Citytunnel de Malmö.

The control of pore pressure and groundwater ingress is a fundamental requirement for tunnels and deep excavations constructed beneath the water table. Grouting is regularly used to reduce the permeability but post grouting permeability often does not match expectations. This paper seeks to address these issues and provides guidance on the likely permeability reductions that can be achieved for weak rocks based on a number of case histories, including the Metro project in Copenhagen, and the Malmö Citytunnel.

#### 5 - Extension du laboratoire souterrain de l'ANDRA ; méthodes et matériels utilisés pour des travaux à sec et sans poussières

##### *Extension of the ANDRA underground laboratory: methods and equipment used for dry, dust-free works*

Tancrède Bonnet-Eymard, Eiffage TP, France - François Ceccaldi, Compact Filter Technic GmbH, Germany - Laurence Richard, Andra, France

Les auteurs présentent les méthodes d'excavation (marteaux hydrauliques, tunnelier à attaque ponctuelle) et les structures de soutènement utilisées pour les travaux d'extension du Laboratoire souterrain de l'Andra à Bure (France) - galeries, avec ou sans voûtes - rameaux de croisement en béton ou acier. Les auteurs exposent les solutions techniques développées pour répondre aux contraintes spécifiques de ce chantier hors du commun :

- Sélection et adaptation d'une machine afin de respecter la géométrie des sections de galeries et d'un système de descente de matériel adapté aux dimensions réduites de l'ouvrage.
- Conception de systèmes à haute performance de dépoussiérage à sec (poussière résiduelle  $< 0,1 \text{ mg/m}^3$ ). Cette contrainte forte résulte principalement du fait que le laboratoire reste en fonctionnement pendant les travaux et que les appareils utilisés pour les expériences scientifiques ne tolèrent pas la poussière, et, d'autre part, du fait que la marne du Callavo-Oxfordien (appelée «argillite») de Bure est extrêmement sensible à l'eau. Ces systèmes de dépoussiérage travaillent en mode automatique avec contrôle continu des performances, auto-nettoyage et stockage étanche des poussières.
- Sélection des autres machines, en particulier pour le boulonnage, le chargement et le transport de matériaux, la pose de cintres et la mise en œuvre de béton projeté. Toutes ces machines sont adaptées aux galeries de petites dimensions (sections entre 19 et 27 m<sup>2</sup>).

Result of presentation for excavation methods (hydraulic breakers, roadheader tunnelling machine) and retaining structures concepts used for that extension works of ANDRA's Underground Laboratory in Bure (France) – galleries with or without arches ; steel or concrete tunnels crossings – Writers build up technical solutions developed according to fulfil the specific constraints of this uncommon construction site:

- Selection and adaptation of a machine in order to respect the geometry of the tunnel sections, and for a packing adapted to the descent by a material line of restricted dimensions.
- Design of high-performance dry dedusting systems (residual dust  $< 0.1 \text{ mg/m}^3$ ). This strong constraint results from the main fact that the laboratory is in simultaneous operation with works then, devices of the scientific experiments (operates during digging) can't tolerate dust, and, on the other hand, from the fact that the Callavo-Oxfordian clay stone (called "argillite") in Bure, is extremely sensitive to water. Those dust removal systems work in an automatic continuous performances control mode with self cleaning and dusts hermetic storage.
- Selection of the other machines, especially for bolting, loading and conveying materials, erecting arches and shotcreting. These machines are adapted to galleries of small dimensions (sections between 19 and 27 m<sup>2</sup>).

## 6 - Contrôle des risques géotechniques grâce à un tunnelier double-mode reconfigurable ; étude du cas de la ligne 9 du Métro de Barcelone

### *Geotechnical risks management with dual-mode reconfigurable tbm : the case study of Barcelona metro Line 9*

Thomas Camus, NFM Technologies, France - Gilbert Fontanille, NFM Technologies, France - Oriol Ribas Escolà, UTE Linea 9, Spain - Ignasi Castellvi, UTE Linea 9, Spain - Jean-François Fontaine, NFM Technologies, France

Le creusement du tunnel de 34 km de longueur de la ligne 9 du métro de Barcelone représente un véritable défi à de nombreux titres.

Le tracé comporte plusieurs croisements d'autres lignes et des sections forées simultanément avec des machines provenant de deux fournisseurs différents. Cela implique une organisation complexe et un séquençage précis des travaux. Toutefois, le principal défi de ce projet réside dans la gestion de la très grande variété de terrains tout en assurant une sécurité totale dans une zone urbaine dense et en maintenant un rendement élevé d'avancement du creusement du tunnel.

La géologie le long de la ligne 9 consiste en un premier tronçon de roche fracturée (4,3 km), puis pour le second tronçon une séquence de sable granitique (1,4 km), de roche granitoïde très dure avec des inclusions de porphyre (1 km), et à nouveau un sol tendre (2,7 km). L'approche standard consisterait à utiliser deux tunneliers de type différent, à savoir une machine « rocher dur » pour la partie de roche granitoïde, et un EPB ailleurs. Mais cela est difficilement applicable à des tronçons courts et cette solution a été rejetée en raison de son coût élevé. Une autre idée consisterait à utiliser un seul TBM « universel ». Cependant cela n'est pas possible avec des types de sol aussi différents, et les compromis inévitables aboutiraient à des risques accrus quant à la stabilité du sol et à la capacité d'excavation. Pour ces raisons, il a été décidé d'opter pour un TBM unique et de planifier sa reconfiguration à des points prédéfinis correspondant aux principaux changements géologiques.

La validité de cette approche a été entièrement démontrée tout au long de l'avancement du tunnelier. Une planification et des études géologiques soignées ont permis de concevoir à la fois les configurations optimales du tunnelier en fonction des caractéristiques du sol, et une méthode innovante pour la mise en œuvre des modifications correspondantes. Trois têtes de coupe ont été conçues et livrées. Un système mécanisé de changement de tête de coupe a été conçu, qui a permis un changement in situ sûr et rapide : cette opération a été réalisée avec succès à deux reprises, en passant du mode EPB au mode roche dure, puis retour au mode EPB. Aucun tassement n'a été détecté lors des avancements, et de très bonnes performances de creusement ont été enregistrées depuis le début en Juin 2003.

Boring the 34-km long tunnel of the Barcelona Metro line 9 is a real challenge in many aspects.

The layout comprises several crossings with other lines, and branches that are bored simultaneously with machines from two suppliers. This requires a complex organisation and accurate sequencing of works. However the main challenge in the project consists in handling the very wide variety of ground while ensuring full safety in a dense urban area and maintaining a high tunnelling efficiency.

Geology along line 9 is a first drive of fractured rock (4.3 km), then for the second drive a sequence of granitic sand (1.4 km), very hard granitoid rock with porphyry inclusions (1 km), and back to soft soil (2.7 km). The standard approach would be to use two TBMs of different types, i.e. a hard-rock machine for the granitoid rock section, and an EPB elsewhere. This is hardly applicable to short bores and was rejected because of its high costs. Another idea would consist in using a single "universal" TBM. However this is not possible with so different ground types, and the unavoidable trade-offs would result in increased risks concerning ground stability and boring capability. For these reasons, it was decided to opt for a single TBM and plan for its reconfiguration at predefined points corresponding to the main geological changes. The validity of this approach has been fully proven throughout the drives. Careful planning and geological surveys have allowed designing both the optimum configurations of the TBM with respect to the ground characteristics, and an innovative method for executing the corresponding changes. Three cutter heads have been designed and delivered. A mechanised cutter head change system was designed that allowed a safe and fast exchange in situ: this operation was successfully performed twice, changing from EPB to hard rock, and back to EPB. No settlement was detected along the drives, and very good tunnelling performances were recorded since the start in June 2003.

## 7 - Revêtements de parements dans les tunnels routiers et les espaces souterrains

### *Wall facings in road tunnels and underground spaces*

Catherine LARIVE, CETU, France - Laurent CHASSAGNE, RATP, France - David CHAMOLEY, CETU, France - Matthias NEUKOMM, BG Ingénieurs conseils - Alain CHASTEL, Marseille Provence Métropole - Jean-Louis MAHUET, Egis Rail, France

Considérant d'une part l'intérêt croissant et la nécessité des constructions souterraines et d'autre part les craintes persistantes de nombreux utilisateurs, les parements des parois latérales peuvent être vus comme un moyen supplémentaire d'améliorer le confort et la sécurité des usagers et donc promouvoir l'utilisation des espaces souterrains.

L'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES) a demandé à un de ses groupes de travail d'étudier ce sujet (GT 34). La première partie des recommandations du groupe de travail, présentée dans cet article, traite des attentes des propriétaires en matière de parements, pour les tunnels routiers et les espaces souterrains tels que les gares.

Les avantages et les inconvénients des parements sont présentés ici, avant de proposer une sélection de critères couvrant toute la gamme des attentes des clients ainsi que des essais adéquats pour évaluer la performance de divers produits. Les critères sont classés dans des catégories liées à : • la compatibilité avec la structure, • la sécurité, • le coût global, • la maintenance, • la durabilité, • l'esthétique, • la mise en œuvre, • le développement durable. Enfin, une méthode est proposée pour évaluer les propositions des fournisseurs et entrepreneurs, basée sur ces critères fondamentaux et sur les valeurs attribuées aux autres.

Considering on the one hand the growing interest and need for underground construction and on the other hand the persisting fears of many users, the facings of sidewalls can be seen as an additional means of improving the

comfort and safety of users and thus promoting the use of underground spaces.

The French Tunnelling Association (AFTES) has requested one of its working groups to study this subject (WG 34). The first part of the working group recommendations, presented in this paper, deals with the expectations of owners towards facings, for road tunnels and underground spaces such as railway stations.

The pros and cons of facings are presented here before proposing a selection of criteria covering the whole range of expectations of the client as well as adequate tests for evaluating the performance of various products. Criteria are classified in categories linked to: • compatibility with the structure, • safety, • global cost, • maintenance, • durability, • aesthetic, • implementation, • sustainable development. Finally, a method is proposed for evaluating the proposals of suppliers and contractors, based on the selection of fundamental criteria and weights attributed to the others.

## 8 - Liaison aéroport de Brisbane ; utilisation de fibres acier et fibres polypropylène pour la protection au feu de voussoirs préfabriqués

### *Brisbane airport link (APL) : the use of steel fibre and PP fibre for fire protection in precast tunnel segment production*

**Benoît de Rivaz**, NV Bekaert SA

La liaison à l'aéroport de Brisbane est un des projets le plus prestigieux et le plus connu pour son utilisation de voussoirs béton armé de fibres métalliques. Cet article donne les informations principales relatives au projet et en discute les aspects principaux, en particulier sur les fibres métalliques. Certes les fibres d'acier ont déjà été utilisées depuis longtemps dans le monde entier comme armatures de voussoirs préfabriqués en béton. Cependant leur application dans ce domaine a été entravée par l'absence de cadre réglementaire applicable à ce type de produit. Avec la publication de normes européennes spécifiques aux fibres métalliques et avec l'existence de recommandations nationales sur les calculs (Rilem TC 162, Code Model édité par la Fédération des Ingénieurs Britanniques), l'utilisation de béton fibré dans les ouvrages est aujourd'hui rendue possible. La liaison de l'aéroport de Brisbane sera certainement une nouvelle référence importante dans ce domaine.

The Brisbane airport link is one of the most high profile and well publicized project to use steel fibre reinforced segmental linings.

This paper will provide the key information about the project and discuss the main design aspects taking into account steel fibres in detail.

Indeed steel fibres have for many years been used as reinforcement in precast segment tunnel linings in many parts of the world. However, their application and use in this domain have been stifled due to the limited, or absence of a regulatory framework covering this type of product. With the publication of European standards specifically dealing with steel fibres, and the existence of national recommendations concerning the design (Rilem TC162, Code Model edited by the fib), the use of fibre concrete in structures has now become possible. Brisbane Airport link will be certainly a new main reference in this field.

## 9 - Vue générale sur les risques en tunnel

### *Risk in tunnels: a global overview*

**Benjamin TRUCHOT**, INERIS, France - **Mame WILLIAM-LOUIS**, UVHC, France - **Adel BENSELAMA**, UVHC, France - **Luc FOURNIER**, EGIS TUNNEL, France - **Christophe PROUST**, INERIS, France - **Jerome DAUBECH**, INERIS, France - **François Monnoyer**, UVHC, France

Le feu est malheureusement un phénomène courant dans les tunnels routiers. Il faut cependant garder à l'esprit que certains autres risques peuvent être rencontrés: libération de gaz toxiques ou inflammables, ou explosion. Classiquement, l'approche en matière de sécurité pour les tunnels routiers consiste à concevoir le système de ventilation en fonction des hypothèses de feu du projet. En raison de récents incendies accidentels en tunnel, ce phénomène a été amplement étudié. Cependant, même si de nombreuses études existent, certaines questions demeurent ouvertes. En outre, il existe moins d'études sur les deux autres phénomènes (gaz / explosion) alors que le risque existe bien qu'avec une probabilité plus faible.

Pour ces trois phénomènes, une approche est proposée, basée à la fois sur des expériences et sur une simulation numérique. Des campagnes expérimentales ont permis d'améliorer la connaissance physique de ces différentes situations. La stratification a été étudiée pour les cas d'incendie et, pour les cas d'explosion, la propagation et la réflexion des ondes de pression ont été caractérisées ; est également décrit le comportement du nuage de gaz lourd dans le tunnel. Ces résultats expérimentaux ont été utilisés pour la validation du modèle numérique.

Fire is unfortunately a common phenomenon in road tunnel. It must however be kept in mind that some other risks can be encountered: gas release, toxic or flammable gases, or explosion. Classically, the safety approach for road tunnel consists in designing the ventilation considering the design fire. Because of recent accidental fires in tunnel, this phenomenon was largely studied. However, even if a lot of studies exist, some questions are still open. On top of that, there is less studies on the two other phenomena while the risk exists, with a lower probability.

For these three phenomena an approach based on both experiments and numerical simulation is proposed. Experimental campaigns have provided an increase of the physical knowledge about these different situations. The stratification was studied in case of fire, pressure wave propagation and reflexion in case of explosion were characterized and heavy gas cloud behaviour in tunnel is described. These experimental results were used for numerical code validation.

## 10 - Une scie géante pour réduire les tassements sur un chantier de tunnel à très faible profondeur sous Paris

### *A giant saw to minimise settlement for works for a very shallow tunnel under Paris*

**Bernard Bizon**, BEC- Fayat group, France - **Valérie Dore**, Soletanche-Bachy, France - **Frédéric Martarèche**, BEC- Fayat group, France

Les travaux de tunnel pour l'extension de la ligne 4 du métro, et notamment la section sous le boulevard périphérique parisien, avec une couverture très faible de moins de 4,5 m, a conduit les responsables du métro à accorder une attention

très particulière à des méthodes garantissant un tassement du sol minimal. Le groupement d'entreprises BUSS a proposé une solution alternative appelée la méthode Perforex, qui conduit à des niveaux de tassement beaucoup plus bas qu'avec les méthodes conventionnelles.

La méthode Perforex a souvent été utilisée dans les travaux souterrains de la région parisienne (RER, métro, tunnels routiers, TGV). Il consiste à découper à la scie, à l'avant du front de taille, une fente qui est ensuite remplie de béton projeté. Cette pré-voûte projetée constitue ainsi une protection pour les travaux de creusement du tunnel et renforce la partie de sol située sous les structures en surface.

Face à des difficultés géologiques imprévues, la méthode s'est cependant avérée tout à fait efficace.

Le rendement hebdomadaire prévu a été atteint et le tassement en surface réellement observé au cours des travaux s'est avéré conforme aux calculs effectués lors de la phase de projet.

Tunnelling work for the extension of Line 4 of the Metro, and notably the section under the Paris ring road, with a very shallow clearance of less than 4.5m, required the Metro operator to give very special consideration to methods guaranteeing minimum ground settlement.

The BUSS group of companies put forward an alternative solution called the PERFOREX method, which results in much lower levels of settlement than conventional methods.

The PERFOREX method has often been used in underground works in Paris area (RER, metro, road tunnels, TGV). It consists of sawing a slot in the ground ahead of the face which is then filled with sprayed concrete. The rigid pre-vault provides protection for the work in the tunnel and strengthens the underground area for structures above ground.

Facing geological unforeseen difficulties, the method proved however its efficiency.

The weekly rhythm was achieved and the surface settlement actually observed during the work complied with the calculations made during design stage.

## 11 - Evaluation du cycle de vie (ECV) appliqué aux tunnels : impacts environnementaux potentiels des « matériaux » de génie civil

### *Life cycle assessment (LCA) applied to tunnels: potential environmental impacts of civil engineering "materials"*

Laetitia D'Aloia Schwartzentruber, CETU, MEEDDM, France - Fabien Rival, BARPI, MEEDDM, France - H. Kote, ENTPE, France - Michel Deffayet, CETU, MEEDDM, France

L'Évaluation du Cycle de Vie (ECV) est l'une des méthodes mises au point pour évaluer les impacts potentiels des « produits » et « services » sur l'environnement. Pour les "tunnels", une grande question concerne les impacts relatifs aux travaux par rapport à ceux de la conception et la construction. Cela pourrait être accentué par la grande durée de vie de la structure et pourrait conduire à anéantir et décourager les efforts pour optimiser le choix des matériaux et des techniques de construction (au moins du point de vue environnemental !). Les impacts potentiels des tunnels sur l'environnement sont généralement déterminés par les choix techniques et la conception des structures qui dépen-

dent des conditions du site, des aspects économiques et des contraintes liées à la phase de construction. Ainsi, la flexibilité quant à leur limitation peut ne pas être aussi grande qu'elle pourrait l'être.

Néanmoins, compte tenu des priorités de la plupart des gouvernements sur le réchauffement climatique et la préservation des ressources naturelles, il paraît très intéressant de greffer une nouvelle série de critères environnementaux sur le choix d'une solution technique. Cela implique une bonne connaissance des aspects techniques tels que méthodes d'excavation, de soutènement, de revêtement, ainsi que des contrôles lors de la phase d'exploitation.

La première étape du travail a consisté à appliquer l'ECV aux "matériaux" de génie civil. Cela a été fait sur la base de la description de plusieurs solutions techniques typiques mises en œuvre lors du creusement de tunnel à l'explosif. La deuxième étape porte sur la contribution de l'acier et des bétons (environ 80% des impacts environnementaux des matériaux de génie civil) et sur la fiabilité des données environnementales. L'ECV est également appliquée à certains aspects de la construction tels que l'élimination et la réutilisation des matériaux excavés.

L'application de l'ECV aux tunnels est une lourde tâche. Elle implique de considérer le cycle de vie complet du tunnel et d'optimiser la conception même des infrastructures. Toutefois, l'ECV nous donne la clé pour convaincre les gens que les infrastructures souterraines sont un moyen de préserver des conditions de vie meilleures en surface.

Life Cycle Assessment (LCA) is one of the methods being developed to assess potential impacts of "products" and "services" on the environment. For "tunnels", a great issue is linked to the impacts of operation compared to those of design and construction. This could be accentuated by the great lifetime of the structure and could lead to dash and discourage efforts for optimizing the choice of materials and construction techniques (at least from the environmental point of view!).

Potential impacts of tunnels on the environment are usually determined by technical choices and structure design which depend on site conditions, economic aspects and constraints linked to the construction phase. Thus, the flexibility to limit them may not be as great as it could be.

Nevertheless, considering the priorities of most governments about global warming and preservation of natural resources, it seems to be of great interest to graft a new set of environmental criteria for choosing a technical solution. This implies a good knowledge of technical aspects like methods of excavation, support, lining, as well as the control of the operating phase. The first step of the work consisted in applying LCA to "materials" of civil engineering. This has been done on the basis of the description of several typical technical solutions in the case of drill & blast tunnelling. The second step addresses the contribution of steel and concretes (about 80% of environmental impacts of civil engineering materials) and the reliability of environmental data. LCA will also be applied to some aspects of construction like disposal and reuse of excavated materials.

Applying LCA to tunnel is a heavy task. It implies considering the entire life cycle of the tunnel and optimizing the infrastructure design itself. However, LCA will give us the key to convince people that underground infrastructures are a way to preserve the surface for better living conditions.

## 12 - L'analyse du risque géologique est-elle toujours pertinente ?

### *Is geological risk analysis always relevant?*

**Cédric Gaillard**, Tunnel Study Centre, France - **Emmanuel Humbert**, Tunnel Study Centre, France - **Fabien Rival**, Bureau for analysis of industrial risks and pollution (BARPI), France - **Alain Robert**, Tunnel Study Centre, France

Les travaux souterrains impliquent toujours un certain degré d'incertitude lié à la connaissance forcément partielle des formations géologiques avant qu'on les rencontre. Face à ce manque de connaissances, les maîtres d'ouvrage constituent une provision financière. Autrefois totalement empirique, l'estimation d'une telle provision est aujourd'hui basée sur l'analyse de risque qui, malgré sa popularité, ne se révèle pertinente que si certaines conditions sont remplies :

- Un minimum de reconnaissances géologiques et de connaissance du site est nécessaire pour avoir une idée de la complexité du contexte géologique et permettre d'effectuer une analyse des risques. La pertinence et la fiabilité des sources de données doivent être évaluées afin de développer un modèle géotechnique approprié. Une connaissance trop partielle ne peut pas (sauf cas fortuit) conduire à un modèle fiable.
- Une description aussi complète que possible des événements liés à l'excavation et au soutènement dans les formations décrites dans le modèle géologique doit être obtenue pour servir de base à l'analyse des risques. Cette tâche consiste à faire un inventaire de tous les événements redoutés, l'estimation individuelle de leurs conséquences (coûts, délais), ainsi que la probabilité -et les répercussions sur ces deux facteurs- de rencontrer plusieurs fois le même événement.

Cet article donne des précisions sur la méthode d'analyse des risques développée par le Centre d'études des tunnels (CETU) avec un accent particulier sur :

- Le développement d'un modèle géotechnique (niveau minimum de reconnaissances sur le site, évaluation du niveau de connaissances) ;
- L'identification des événements redoutés, en donnant une description détaillée de leurs conséquences (retards, coûts en termes de parts constantes et variables, effet de surprise, effets d'événements répétés), et en estimant leur probabilité d'occurrence (autres événements, interdépendance spatiale d'événements).

Underground works always involve a degree of uncertainty related to the necessarily partial knowledge of geological formations before these are crossed. Faced with this lack of knowledge, building owners build up a financial provision. Formerly fully empirical, the estimation of such a provision is nowadays based on risk analysis that, despite their popularity, only prove to be relevant if certain requirements are met:

- A minimal amount of site investigation and knowledge is needed to get an idea of the complexity of the geological context and perform risk analysis. The relevance and reliability of data sources must be assessed in order to develop a proper geotechnical model. Too partial knowledge cannot (saved fortuitous case) lead to a reliable model.
- A description as thorough as possible of events associated to excavation and support in the formations described in the geological model must be obtained to ground risk analysis. This task consists in making an inventory of all feared events, estimating individually their consequences (costs, delay), their likelihood and the effect on both of successive encounters of a same event.

This article gives precisions on the risk analysis method developed by Tunnels study centre (CETU), with a particular focus on:

- The development of a geotechnical model (minimum amount of site investigation, assessment of the level of knowledge);
- Identifying dreaded events, giving a detailed description of their consequences (delays, costs in terms of constant and variable parts, surprise effect, effects of successive encounters), estimating the likelihood of events (alternative events, spatial interdependence of events).

## 13 - Béton résistant à l'écaillage ou protection passive ?

### *Spalling resistant concrete or passive protection?*

**Céline Lenglet**, CETU, France

Afin de satisfaire aux nouvelles exigences concernant la résistance au feu, la protection passive a été installée dans de nombreux tunnels. Panneaux ou mortiers projetés sont des réponses satisfaisantes quant à la résistance au feu des tunnels existants. Ils sont également utilisés efficacement dans des tunnels récemment construits. Pourtant, pour des tunnels en projet, une autre solution peut être étudiée. Au lieu de protéger le tunnel, il peut être conçu pour être résistant au feu. Cette approche comporte plusieurs étapes. Le comportement thermique de la structure doit être étudié. Des armatures supplémentaires et une composition de béton spécifique sont nécessaires. Le béton doit être soumis à des essais au feu dont les résultats seront pris en compte lors de la phase de calcul. Ces étapes nécessitent du temps et de la planification. Pourtant, cette alternative innovante peut être intéressante et pas seulement du point de vue économique. D'une part, les questions d'inspection, de délavage ou de pérennité peuvent être résolues. D'autre part, dans le cas d'un incendie, les dommages à la structure ne mettent pas en danger les usagers et les équipes de secours, mais peuvent nécessiter des réparations importantes.

Cet article présente les avantages et les inconvénients de chaque solution, des études de cas et des descriptions d'exemples récents concernant la résistance au feu sans protection passive.

In order to satisfy the new requirements regarding fire resistance, passive protection has been installed in many tunnels. Panels or sprayed mortars are satisfactory answers to the fire resistance aspect of existing tunnels. They are also efficiently used in new build tunnels. Yet, in tunnels to be built, another solution can be studied. Instead of protecting the tunnel, it can be designed to be fire resistant. This approach involves several steps. The thermal behaviour of the structure has to be studied. Extra reinforcement and a specific concrete mix are necessary. The concrete mix needs to be submitted to fire tests whose results will be taken into account during structural design. These steps require time and planning. Yet, this innovative alternative can be interesting, not just from the economic point of view. On the one hand, inspecting, washing or durability issues can be solved.

On the other hand, in the event of a fire, the damages to the structure will not endanger the users and the rescue teams, but may lead to major repairs.

This article will present the advantages and drawbacks of each solution, case-studies and recent examples based on fire resistance design without passive protection.