

RECOMMANDATIONS AITES POUR LA RÉSISTANCE STRUCTURELLE AU FEU DES TUNNELS ROUTIERS

par Henry A. RUSSELL, Animateur, Association internationale des Travaux en Souterrain (AITES) ;
Groupe de travail 6 : réparation et entretien des ouvrages souterrains

INTRODUCTION

Plusieurs gros incendies se sont déclarés ces dernières années dans des tunnels routiers. Ces incendies ont causé de nombreuses pertes en vies humaines ainsi que des dommages importants à l'infrastructure. De plus, les effets à long terme sur l'infrastructure locale, et la perte de confiance du public dans la sécurité des tunnels ont conduit à la préparation de cette recommandation. Celle-ci doit être utilisée pour identifier la catégorisation des tunnels routiers et pour proposer des méthodes de protection des éléments structurels. L'objectif primordial de ce document est de veiller à la sécurité du public et du personnel de secours dans le cas d'un incendie dans le tunnel.

Dans cette optique, l'ensemble du tunnel doit être protégé de l'éboulement pendant une période de temps déterminée. Cette potentialité d'effondrement est particulièrement importante pour des tunnels immergés, et des tunnels dans un environnement urbain qui sont situés sous des bâtiments ou d'autres constructions. Le deuxième point de ce document est d'assurer une protection adéquate des propriétés, qui incluent aussi des coûts indirects associés au dérangement des affaires, de l'économie locale et au rétablissement de l'exploitation normale.

Bien que l'ingénierie de la sécurité au feu soit de plus en plus utilisée dans d'autres domaines en tant qu'approche à la résistance au feu basée sur les performances, il a été convenu entre l'AIPCR et l'AITES qu'une telle approche n'était actuellement pas assez sophistiquée en ce qui concerne les tunnels. L'effort commun AIPCR-AITES a par conséquent visé à une conception basée sur une courbe déterministique température-temps (plus classique, approche prescriptive), au moins dans un premier temps.

ITA GUIDELINES FOR STRUCTURAL FIRE RESISTANCE OF ROAD TUNNELS

par Henry A. RUSSELL, Animateur,
International Tunnelling Association (ITA)
Working Group 6; Repair and Maintenance
of Underground Structures

INTRODUCTION

Over the last few years there have been a number of serious underground fires in road tunnels. These fires have caused extensive loss of life and severe collateral loss to the infrastructure. Aside from the tragic loss of life, the long-term financial effects to the local infrastructure, the loss of public confidence in the safe use of tunnels have necessitated the development of this guideline. This guideline is to be used to identify the categorization of road tunnels and to propose methods for the protection of the structural elements. The primary focus of this document is to provide for the safety of the public and rescue personnel in the event of a fire within the tunnel system.

For these purposes, the tunnel system must be protected from collapse during a specified time period. The potential for collapse is particularly important for submerged tunnels (immersed tube tunnels), and tunnels in urban environment that are located under other buildings or structures. The second focus of this document is to ensure appropriate protection of property, which also involves indirect costs associated with the disruption to business, the local economy and the restoration of the facility to normal operation.

Although fire safety engineering is increasingly used in other fields as a performance-based approach to fire resistance, it had been agreed between PIARC and ITA that such an approach was currently not sophisticated enough with regard to tunnels. Consequently, the joint PIARC-ITA effort has aimed at a deterministic temperature-time curve design (more classical, prescriptive approach), at least as a first step.

RECOMMANDATIONS PROPOSÉES

Les recommandations proposées pour les critères de conception sont présentées dans le tableau 1 (voir aussi article précédent). Ce tableau distingue le type de trafic (et, par conséquent la charge possible en matière d'incendie) et les conséquences d'une faute structurelle due à un incendie lorsque les conséquences sont inacceptables, lorsqu'une protection contre un incendie extrêmement sévère est nécessaire (p. ex. tunnel immergé ou en terrain instable) ; lorsque les conséquences sont limitées, aucune protection n'est nécessaire (p.ex. tunnel en terrain stable).

Tableau 1

Recommandations AIPCR

	Structure principale Main Structure				Structures secondaires ⁽⁴⁾ Secondary Structures			
Type de trafic Traffic type	Superstructure immergée ou souterraine Immersed or under/inside superstructure	Tunnel en terrain instable Tunnel in unstable ground	Tunnel en terrain stable Tunnel in stable ground	Tranchée couverte Cut & Cover	Ventilation ⁽⁵⁾ Air Ducts	Sorties de secours vers l'air libre Emergency exits to open air	Sorties de secours vers autre tube Emergency exits to other tube	Abris ⁽⁶⁾ Shelters
Voitures Cars/Vans	ISO 60 min	ISO 60 min	(2)	(2)	ISO 60 min	ISO 30 min	ISO 60 min	ISO 60
Camions Trucks/Tankers	RWS/HC _{inc} 120 min ⁽¹⁾	RWS/HC _{inc} 120 min ⁽¹⁾	(3)	(3)	ISO 120 min	ISO 30 min	RWS/HC _{inc} 120 min	RWS/HC _{inc} 120 min ⁽⁷⁾

(1) 180 min peuvent être requises pour des camions transportant des marchandises combustibles.

(2) La sécurité n'est pas un critère et ne demande aucune résistance au feu (autre qu'éviter un effondrement progressif). La prise en compte d'autres objectifs peut conduire aux besoins suivants :

- ISO 60 min dans la plupart des cas.
- Pas de protection du tout si la protection structurelle est trop chère comparée au coût et aux inconvénients des travaux de réparation après un incendie (p.ex. couverture légère pour protection contre le bruit).

(3) La sécurité n'est pas un critère et ne demande aucune résistance au feu (autre qu'éviter un effondrement progressif). La prise en compte d'autres objectifs peut conduire aux besoins suivants :

- RWS/HC_{inc} 120 min si une forte protection est demandée par suite des propriétés (p.ex. tunnel sous un bâtiment) ou grande influence sur le réseau routier.
- ISO 120 min dans la plupart des cas, lorsque ceci permet une protection relativement bon marché pour limiter les dommages aux propriétés.
- Pas de protection du tout si la protection structurelle est trop chère comparée au coût et aux inconvénients des travaux de réparation après un incendie (p.ex. couverture légère pour protection contre le bruit).

(4) D'autres structures secondaires devraient être examinées au cas par cas.

(5) Dans le cas de ventilation transversale.

(6) Les abris devraient être raccordés à l'air libre.

(7) Une plus longue durée peut être utilisée s'il y a un trafic très important de camions transportant des marchandises combustibles et si l'évacuation depuis les abris n'est pas possible en moins de 120 min.

Les tableaux 1 et 2 utilisent la courbe ISO et soit la courbe RWS soit la courbe HC_{inc} pour définir les critères de conception en diverses circonstances. L'AIPCR estime que les courbes RWS et HC_{inc} correspondent à des niveaux de résistance au feu très identiques, et qu'une seule des deux devrait être utilisée. ISO TC92/SC2 estime également que le choix n'a pas d'impact, mais considère que la courbe HC_{inc} constitue un choix plus naturel et meilleur, si une seule courbe devait être retenue. L'AIPCR propose actuellement que l'une ou l'autre de ces courbes soit utilisée, avec des résultats très similaires.

En se basant sur l'information montrée ici et sur celle mise à disposition par le Comité AIPCR il a été convenu que les courbes température-temps seraient modifiées pour tenir

PROPOSED GUIDELINES

The proposed guidelines for design criteria are presented in Table 1 (see also previous article). This table makes a distinction according to the type of traffic (and, consequently, the possible fire load) and the consequences of a structural failure due to a fire when the consequences are unacceptable, a protection against a very severe fire is required (e.g. submerged tunnel or in unstable ground); when the consequences are limited, no protection is needed (e.g. tunnel in stable ground).

Table 1

Recommendations of PIARC

(1) 180 min maybe required for very heavy traffic of trucks carrying combustible goods.

(2) Safety is not a criteria and does not require any fire resistance (other than avoiding progressive collapse). Taking into account other objectives may lead to the following requirements:

- ISO 60 min in most cases.
- No protection at all if structural protection would be too expensive compared to cost and inconvenience of repair works after a fire (e.g. light cover for noise protection).

(3) Safety is not a criteria and does not require any fire resistance (other than avoiding progressive collapse). Taking into account other objectives may lead to the following requirements:

- RWS/HC_{inc} 120 min if strong protection is required because of property (e.g. tunnel under a building) or large influence on road network.
- ISO 120 min in most cases, when this provides a reasonably cheap protection to limit damage to property.
- No protection at all if structural protection would be too expensive compared to cost and inconvenience of repair works after a fire (e.g. light cover for noise protection).

(4) Other secondary structures should be defined on a project basis.

(5) In case of transverse ventilation.

(6) Shelters should be connected to the open air.

(7) A longer time may be used if there is a very heavy traffic of trucks carrying combustible goods and the evacuation from the shelters is not possible within 120 min.

Tables 1 and 2 use the ISO curve and either the RWS or the HC_{inc} curve to define design criteria for different circumstances. PIARC believes that the RWS and HC_{inc} curves correspond to very similar levels of fire resistance, and only one of the two should be used. ISO TC92/SC2 also believes that which one you use has no impact, but considers that the HC_{inc} curve is a more natural, better choice, should one only be kept. Currently PIARC proposes that any of these curves can be used, with very similar results.

Based on the information shown here and provided by the PIARC Committee it has been determined that the temperature vs. time curves should be modified to reflect

compte de l'utilisation typique des tunnels routiers et d'une classification plus générale des incendies en tunnel. Une attention a été portée aux types de structures de tunnels, à la section transversale, aux matériaux et à l'expérience des gestionnaires et concepteurs de tunnels. La courbe temps/température AITES modifiée classifie aussi les incendies en se basant sur l'utilisation, et ne prend pas en considération le système ou la méthodologie de suppression du feu. Pour une conception aisée, les catégories de tunnels routiers sont présentées dans le tableau suivant.

Classification	Type de Véhicule
Catégorie 1	Voitures seules, pas de camions
Catégorie 2	Camions
Catégorie 3	Camions-citernes (à essence)
Catégorie 4	Cas spéciaux de tunnels immergés

La classification générale des tunnels en fonction du dégagement de chaleur par et la durée de l'incendie est élargie au type de tunnel et au risque potentiel d'effondrement.

Tableau 2

Recommandations pour des critères de résistance au feu des structures de tunnels routiers

Catégorie	Nombre de véhicules impliqués	Tunnel immergé	Tunnel en terrain instable	Tunnel en terrain stable	Tranchée couverte	Conduits de ventilation	Sortie de secours	Sortie vers l'autre tube	Abris
Category	Number Vehicles Involved	Immersed Tunnel	Tunnel in Unstable Ground	Tunnel in Stable Ground	Cut & Cover	Air Ducts	Exit to open	Exit to Other Tube	Shelters
1	1-2	ISO 60 min.	ISO 60 min.	(2)	(2)	ISO 60 min.	ISO 30 min.	ISO 60 min.	ISO 60 min.
1	> 3	ISO 60 min.	ISO 60 min.	(2)	(2)	ISO 60 min.	ISO 30 min.	ISO 60 min.	ISO 60 min.
2	1 -2	RWS/HC _{inc} 2 hrs.	RWS/HC _{inc} 2 hrs.	(3)	(3)	ISO 2 hrs.	ISO 30 min.	RWS/HC _{inc} 2 hrs.	RWS/HC _{inc} 2 hrs.
2	> 3	RWS/HC _{inc} 3 hrs.	RWS/HC _{inc} 3 hrs.	(3)	(3)	ISO 2 hrs.	ISO 30 min.	RWS/HC _{inc} 2 hrs.	RWS/HC _{inc} 2 hrs.

(2) La sécurité n'est pas un critère et ne demande aucune résistance au feu (autre qu'éviter un effondrement progressif). La prise en compte d'autres objectifs peut conduire aux besoins suivants :

- ISO 60 min dans la plupart des cas.
- Pas de protection du tout si la protection structurelle est trop chère comparée au coût et aux inconvénients des travaux de réparation après un incendie (p.ex. couverture légère pour protection contre le bruit).

(3) La sécurité n'est pas un critère et ne demande aucune résistance au feu (autre qu'éviter un effondrement progressif). La prise en compte d'autres objectifs peut conduire aux besoins suivants :

- RWS/HC_{inc} 120 min si une forte protection est demandée par suite des propriétés (p.ex. tunnel sous un bâtiment) ou grande influence sur le réseau routier.
- ISO 120 min dans la plupart des cas, lorsque ceci permet une protection relativement bon marché pour limiter les dommages aux propriétés.
- Pas de protection du tout si la protection structurelle est trop chère comparée au coût et aux inconvénients des travaux de réparation après un incendie (p.ex. couverture légère pour protection contre le bruit).

the typical use of road tunnels and a more general classification of tunnel fires. Consideration was given to the types of tunnel structure, cross section, materials and experience of tunnel operators and designers. The modified ITA time/temperature plot also classifies the fires based upon the use and does not consider the fire suppression system or methodology. For ease in design, road tunnel categories are presented in the following Table.

Classification	Type of Vehicle
Category 1	Cars only no Heavy goods vehicles (HGV).
Category 2	Heavy Lorries (HGV)
Category 3	Petrol Tankers
Category 4	Special Cases Immersed Tube Tunnels (ITT)

The general classification of tunnels as determined by fire heat release and fire time duration is further expanded by the tunnel type and potential risk of collapse.

Table 2

Guidelines for Design Criteria for Fire Resistance of Road Tunnel Structures

(2) Safety is not a criteria and does not require any fire resistance (other than avoiding progressive collapse). Taking into account other objectives may lead to the following requirements:

- ISO 60 min in most cases.
- No protection at all if structural protection would be too expensive compared to cost and inconvenience of repair (e.g. light cover for noise protection).

(3) Safety is not a criteria and does not require any fire resistance (other than avoiding progressive collapse). Taking into account other objectives may lead to the following requirements:

- RWS/HC_{inc} 120 min if strong protection is required because of property (e.g. tunnel under a building) or large influence on road network.
- ISO 120 min in most cases, when this provides a reasonably cheap protection to limit damage to property.
- No protection at all if structural protection would be too expensive compared to cost and inconvenience of repair works after a fire (e.g. light cover for noise protection).

CRITÈRES POUR DES MATÉRIAUX RÉSISTANT AU FEU

Les indications suivantes comportent des méthodes fondamentales pour la protection de la structure des tunnels vis-à-vis de l'incendie.

- augmentation de la résistance au feu de la structure elle-même,
- application d'une peinture qui retarde le transfert de chaleur vers la surface de la structure,
- revêtement secondaire,
- installation de matériaux de protection anti-feu.

Performance requisite

Comme pour les méthodes de protection de la structure en béton. En cas d'incendie, elles sont les plus populaires. Les types d'installations de base sont des panneaux et des projections.

Cette méthode de construction a une caractéristique : elle peut être appliquée à la fois pour des tunnels anciens et nouveaux. Elle est en particulier très utile pour améliorer la résistance au feu des tunnels construits antérieurement.

Lorsqu'on installe des matériaux de prévention d'incendie dans des tunnels routiers, il est nécessaire de prendre en considération les besoins suivants en plus de l'aspect essentiel des qualités de prévention de l'incendie :

● Solidité de l'installation

L'intérieur des tunnels routiers subit d'importantes différences de pression dues au trafic. De nombreux tunnels subissent des différences de pression de l'ordre de 25 Pa. Il est d'autre part rapporté que les tunnels ferroviaires rencontrent des différences de pression de 600 Pa lorsque des trains à grande vitesse passent dans le tunnel. Des différences réciproques de cette nature doivent donc être supportées par les matériaux de résistance au feu, y compris les dispositifs de fixation et les supports. Des preuves de résistance sont à présenter par des laboratoires agréés.

● Prévention des effets secondaires

Comme la température en tunnel est très élevée, des incendies, des fumées et des gaz toxiques peuvent se présenter. Il est donc nécessaire d'utiliser des matériaux qui ne conduisent pas à de tels effets.

● Effets nocifs des matériaux

Il est nécessaire de veiller à ce que les matériaux soient exempts d'effets nocifs pour les personnes pendant la construction. Des matériaux produits dans des sites disposant d'un certificat (environnemental) NEN-ISO 14001 sont donc préférables.

CRITERIA FOR FIRE RESISTANT MATERIALS

The following are fundamental methods for protecting the tunnel structure against fire.

- upgrading fire resistance of structure itself,
- application of a coating that delays heat transfer to the structure surface,
- secondary lining,
- installation of fire protection materials.

Required performance

As for the methods of protecting concrete structure in case of fire, these are the most popular. The basic installation types are panel and spray types.

The characteristic of this method of construction is that it can be applied for both new and old tunnels. Especially, it is very useful in order to improve the fire resistance of the tunnels which was constructed in the past.

When installing fire prevention material in road tunnels, it is necessary to consider the following requirements apart from the most important aspect of fire prevention qualities:

● Installation strength

Interior of traffic tunnels face severe pressure differential due to passing traffic. Numerous tunnels have had face pressure differentials measured in the order of 25 Pa. On the other hand, it is reported that rail tunnels experience approximate pressure differentials of 600 Pa when high speed trains pass the tunnel. Therefore, reciprocal differentials of this nature should be withstood by the fire protection material including the fixation materials and sub-frames. Test evidence by an authorized lab should be presented.

● Prevention of secondary effects

As tunnel temperature is extremely high, fires, smokes and toxic gases may occur. Hence it is necessary to use materials that do not give rise to such effects.

● Harmful effects of material

It is necessary to assure that the material is free from harmful effects to humans during tunnel construction. Materials that are produced in production facilities, having an NEN-ISO 14001 (environmental) certificate are therefore preferred.

● Constructibilité

En ce qui concerne le coût et l'assurance qualité des matériaux de prévention incendie, il est nécessaire de minimiser les pertes en installation, le contrôle d'eau surabondante. La standardisation de la construction est adoptée pour éviter la réduction des résistances au feu.

● Résistance au gel et à la sécheresse

En particulier lorsque des matériaux de prévention incendie sont mis en place dans des tunnels où les températures varient fortement au cours de l'année, ils sont sujets à des effets alternés de sécheresse et d'humidité (gel) dus aux précipitations à l'extérieur du tunnel. Il est dès lors important que la résistance au gel et au dégel de ces matériaux soit évaluée.

- En rapport avec le point (E), les matériaux de protection incendie en tunnel peuvent s'humidifier par des suintements (mineurs) dans la structure du revêtement en béton du tunnel, qui conduira à une situation où les matériaux anti-feu seront totalement saturés en eau. Une humidité relative élevée ou un éclaboussement dû aux véhicules (dans le cas de chaussée humide) causeront également une absorption d'eau par le matériau anti-feu.

Il a été rapporté que certains matériaux anti-feu ne résistent plus au feu lorsqu'ils sont saturés d'eau. Ceci est dû au fait que l'eau s'évapore (le coefficient d'expansion de l'eau vers la vapeur est de 1:1700) et que la vapeur ne peut s'échapper à travers les pores, créant une pression des pores dans le matériau lui-même, et causant un effet d'éclatement et une décomposition du matériau, exactement comme l'éclatement du béton.

Des résultats concluants devraient être présentés par un laboratoire agréé, démontrant que des matériaux anti-feu satisfont aux exigences de protection anti-feu avec < 5 % (en poids) d'humidité et aussi complètement saturés en eau.

● Constructability

As far as construction cost and quality assurance of fire prevention material are concerned, it is necessary to minimize loss in installation, control of rebound water volume, consideration for adjustment of standard measurements in panel-type fixation are exercised. Further, to prevent hindrance to fire resistance qualities, construction standardization is adopted.

● Freezing and thawing resistance

Especially when the fire prevention materials are fixed in tunnels where temperature differentials year around are severe, they are subject to reciprocal effects of drying (thawing) and wetting (freezing) due to precipitation outside the tunnel. Therefore, it is important that freezing and thawing resistance in these materials is evaluated.

- With reference to point (E), fire protection materials in tunnels can get wet due to (minor) leaks in the structural concrete tunnel lining, which will cause a situation where the fire protection materials will get fully saturated with water. High relative humidity or water spray due to passing vehicles (in case of wet road surface) will also cause water absorption of the fire protection material.

It is reported that some water saturated fire protection materials will not be able to withstand a fire anymore. This is due to the fact that the water evaporates (expansion ratio from water to steam is 1:1700) and the vapor can not escape through the pores, creating pore pressure build up in the material itself, causing a spalling effect and decomposition of the material, just like concrete will spall.

Test evidence by an authorized lab should be made available, proving that fire protection materials can meet the fire protection requirements with < 5% (by weight) humidity and also when fully saturated with water.

TYPES DE MATÉRIAUX RÉSISTANT AU FEU

Les matériaux suivants sont le plus souvent utilisés pour la protection des parois de tunnels contre une augmentation rapide de la température.

Type par projection

Revêtements organiques

- Produisent des fumées toxiques denses en cas d'incendie, qui les rendent impropres à une utilisation dans chaque cas où la sécurité humaine est un élément important.

TYPES OF FIRE RESISTANCE MATERIALS

The following materials are most commonly used for the protection of tunnel liners from rapid heat rise.

Spray Type

Organic coatings

- Produce toxic fumes and dense smoke under fire conditions, which make them unsuitable for use in any situation where life safety is an important consideration.

Revêtements inorganiques

- Ces types de produits sont souvent les plus intéressants (rapport coût-efficacité) pour des applications en tunnel.
- Ils sont produits en mélanges ciment/vermiculite préparés et contrôlés en usine destinés à être appliqués par projection sur la surface interne des parois de tunnel.
- Les ciments vermiculite sont essentiellement des matériaux inorganiques, donc qui ne s'éparpillent pas.
- Ils ne peuvent dès lors produire de fumées et sont certifiés non-combustibles.
- Ceci signifie qu'ils peuvent être utilisés dans des endroits où la sécurité doit être prise en considération.
- Ils peuvent être mis rapidement en œuvre par projection sur la surface du tunnel et, si endommagés, aisément réparés (à la main pour de petites surfaces).
- Leur performance vis-à-vis du feu est très prévisible et procure en général une protection du béton arrière pour des durées dépassant les demandes initiales.
- Certaines autorités ont été informées de situations où des ciments-vermiculite ont empêché le béton arrière d'écarter sous des conditions extrêmes de feu pour des durées jusqu'à 24 heures, au moment où l'interface béton/anti-feu a atteint un équilibre.

Inorganic coatings

- These types of products are often the most cost effective for tunnel applications.
- They are produced as factory controlled cement/vermiculite premixes, which are spray, applied directly to the internal surfaces of the tunnel lining.
- Vermiculite cements are essentially inorganic materials and therefore will not burn.
- They can therefore produce no smoke or toxic fumes and are certified non-combustible.
- This means that they can be used in areas where life safety must be considered.
- They can be spray applied quickly to the tunnel surface and if damaged, can be easily repaired (by hand in small areas).
- Their fire performance is very predictable and often provides protection to the concrete substrate for periods of time in excess of its intended fire rating.
- Instances have been documented where vermiculite cements have prevented concrete substrates from spalling under extreme fire conditions for periods of up to 24 hours, at which time the concrete / fire proofing interface has reached an equilibrium.

Panneaux

Propriétés spécifiques de systèmes de panneaux pour la protection anti-feu de structures en béton :

- Des matériaux en panneaux peuvent facilement être contrôlés en ce qui concerne leur épaisseur, et donc leur mise en œuvre peut être garantie pour correspondre aux spécifications.
- Etant fixés mécaniquement, les systèmes de panneaux peuvent supporter les charges dynamiques des véhicules en passage (charges de pression/dépression)
- En général, des matériaux basés sur des panneaux en ciment ne sont pas affectés par des infiltrations d'eau en tunnel et des gaz de combustion.
- Les systèmes en panneau ne demandent en général pas d'entretien du tout. Dans le cas où le béton arrière doit être inspecté, les panneaux peuvent facilement et rapidement être enlevés et réinstallés, en gardant en permanence la couche de protection anti-feu.
- Les systèmes en panneau sont entièrement fabriqués en usine, assurant la qualité du matériau et une composition correcte. La plupart des panneaux sont produits dans des usines certifiées NEN-ISO 9001 et NEN-ISO 14001.

Deux méthodes d'installation de systèmes par panneaux peuvent être définies :

1. – Méthode de coffrage perdu : les panneaux seront installés dans le coffrage. Des vis sont prévues en partie dans les panneaux afin de créer un lien entre le panneau et le béton. Après la mise en place des armatures, le béton

Panel / Board

Specific properties of board systems for the fire protection of concrete structures:

- Board materials can easily be checked for thickness and thus the application can be guaranteed to meet with the specifications as per the tested constructions.
- Being mechanically fixed board systems can cope with the dynamic loads from passing vehicles (pressure/de-pressure loads)
- In general, cement based board materials are unaffected by water ingress in the tunnel and combustion gasses.
- Board systems in general require no maintenance at all. In the case that the concrete substrate needs to be inspected, the boards can easily and quickly be removed and reinstated, thus maintaining the fire protection layer at all times.
- Board materials are totally produced in factories, ensuring the quality of the material and a correct composition. Most board materials are produced in NEN-ISO 9001 and NEN-ISO 14001 certificated factories.

Two methods of installing boards systems can be defined:

1. – Lost shuttering method: the boards will be installed in the form-work, on top of the load bearing plywood. Screws are partly inserted into the fire rated boards to create a bond between the panel and the concrete. After

peut être coulé. Après l'enlèvement du coffrage, les panneaux anti-feu colleront au béton, créant ainsi la couche de protection incendie. Les vis sont ancrées dans le béton, créant un lien solide. Par suite des très faibles coûts de main d'œuvre de ce système, il est très largement utilisé dans des tunnels construits en fouille ouverte et immergés, plutôt que de devoir appliquer par la suite une couche de protection anti-feu.

2. – Installation a posteriori : la méthode de post-installation peut être choisie tant pour des tunnels neufs que pour des tunnels existants. Les panneaux peuvent être installés soit directement sur le béton, soit sur un sous-chassis.

Il convient de noter pour les 2 méthodes d'installation ci-dessus qu'un nouveau développement a été obtenu récemment. En plus des panneaux plats courants en silicate de calcium, le marché offre des panneaux flexibles en silicate aluminé de calcium. Ce matériau arrive en palette comme panneau plat mais peut être courbé sur chantier et permet à l'installateur de pousser facilement le panneau dans la courbure du revêtement de tunnel. Ces panneaux peuvent être mis en œuvre dans des tunnels étroits de 3 m de rayon, en fonction de l'épaisseur du panneau (dépendant des exigences de la protection anti-feu).

Les produits en silicate aluminé de calcium offrent aussi l'avantage d'une très haute performance au feu. Par ailleurs, leur utilisation permet une réduction d'épaisseur d'environ 50 %, comparé aux produits conventionnels.

Un béton résistant au feu a été développé dans le but de protéger la structure du tunnel contre les températures élevées en cas d'incendie. Dans une de ces méthodes, il a été tenté d'augmenter la résistance au feu du béton en y mélangeant des composants chimiques à ceux déjà présents dans le béton ; cette méthode reste à être mise en œuvre en pratique. De nouvelles innovations de ces types de béton résistant au feu sont envisageables, tout en minimisant le coût de nouveaux tunnels à construire dans le futur.

De nombreux matériaux sont actuellement sur le marché pour la protection des éléments structuraux dans un tunnel. De nombreux matériaux sont similaires à ceux utilisés pour la protection traditionnelle des bâtiments en offrant un certain niveau de sécurité incendie imposé par les exigences locales. Ces réglementations locales devraient être consultées lors de la sélection du type de matériau à utiliser pour la protection des éléments structuraux d'un système de tunnel.

the reinforcement is installed the concrete can be poured. After the extraction of the form-work, the fire rated boards will stick to the concrete, thus creating the fire protective layer. The screws are anchored into the concrete creating a firm bond. Due to the very low labor costs of this system, it's intensively used in cut & cover and immersed tunnels, rather than having to apply a fire protection layer afterwards.

2. – Post installation: in both new and existing tunnels the post installation method can be chosen. The boards can be installed, either directly to the concrete or on a sub-frame.

For the above 2 installation methods for board systems it should be noted that a new development was completed recently. Besides the well known flat calcium silicate boards, the market also offers flexible calcium silicate aluminate boards. This material comes as a flat board on a pallet but can be post-curved on the job-site and enables the installer to easily push the board into the curvature of a tunnel lining. Depending on the thickness of the board (linked to the fire protection requirements), these boards can be applied in tunnels as narrow as 3 m radius.

The calcium silicate aluminate hydrate products also offer the advantage of a very high fire performance. This leads to a thickness reduction of approximately 50%, compared to conventional products.

With the objective of protecting the tunnel structure from high temperatures in case of fires, fire resistant concrete has been developed, having upgraded the quality of concrete. In one such method, it has been attempted to increase the fire resistance of concrete by mixing chemical compounds to those existing in concrete, however, this method is yet to be executed in reality. It is expected to meet new innovations of these fire resistant concrete types, thereby minimizing the cost of new tunnels to be constructed in future.

Many materials are currently manufactured for the protection of structural elements in a tunnel structure. Many materials are similar to those used for the traditional protection of buildings in providing a certain fire rating as required by local codes and ordinances. These local regulations should be consulted in the selection and type of material to be used for protection of the structural elements of a tunnel system.

Tableau 3

Matériaux typiques de protection anti-feu pour tunnels

Table 3

Typical Fire protection materials for tunnels

MATÉRIAU MATERIAL	TYPE DE MATÉRIAU TYPE MATERIAL	TYPE DE CONST. TYPE CONST.	FIXATION ATTACHMENT
Panneau en calcium de silice <i>Silicic calcium board</i>	Panneau <i>Panel</i>	Panneau pré-manufacturé <i>Pre-manufactured panel</i>	Ancrages <i>Anchor bolts</i>
Béton léger <i>Light weight concrete</i>	Agrégat léger <i>Light weight aggregate</i>	Attaché à la surface <i>Attached to surface</i>	Projeté/ brossé <i>Spray/ brush-on</i>
Béton CIP <i>CIP Concrete</i>	Ciment <i>Cement</i>	Coulé sur place <i>Cast-in-place</i>	Intégré dans la structure <i>Integral with structure</i>
Béton/fibres CIP <i>CIP Concrete/fibers</i>	Ciment avec poly-fibres <i>Cement with poly fibers</i>	Coulé sur place <i>Cast-in-place</i>	Intégré dans la structure <i>Integral with structure</i>
Béton projeté <i>Shotcrete</i>	Ciment/additifs <i>Cement/additives</i>	Projeté <i>Spray</i>	Projeté <i>Spray</i>
Béton projeté/fibres <i>Shotcrete /fibers</i>	Ciment/additifs/ poly-fibres <i>Cement/ additives/ poly fibers</i>	Projeté <i>Spray</i>	Projeté <i>Spray</i>
Laines minérales <i>Mineral wools</i>	Laine minérale dans une matrice en ciment <i>Mineral wool in cement matrix</i>	Projeté <i>Spray</i>	Projeté <i>Spray</i>
Céramique réfractaire <i>Ceramic Refractory</i>	Ciment réfractaire mélange ciment/ céramique <i>Refractory cement/ceramic mix</i>	Projeté <i>Spray</i>	Projeté <i>Spray</i>

CONCLUSION

Après des discussions approfondies, le groupe de travail a conclu que les tunnels routiers devraient être protégés des influences d'un incendie à haute température conformément aux tableaux 1 et 2. Ceci est nécessaire pour mettre à disposition du public une évacuation sûre, une possibilité de travail pour les équipes d'incendie et de secours, et pour éviter l'effondrement catastrophique de la structure.

Le groupe de travail a également reconnu que de nombreux pays membres disposent déjà de réglementations strictes pour la protection des structures souterraines existantes, et il espère renforcer ces normes en mettant à disposition les recommandations suivantes qui peuvent être utilisées comme des directives pour la protection des tunnels routiers. Ces recommandations ont été développées après un examen approfondi de codes, réglementations, recherches et examens de cas d'incendies en tunnel ; elles sont destinées à mettre à disposition des critères pour la protection de tunnels (auto)routiers existants ou nouveaux. L'information fournie peut s'appliquer à d'autres types de tunnels, pour autant qu'une attention importante soit portée à l'usage du tunnel, et aux types de matériaux qui sont transportés dans les tunnels. Ces recommandations ne sont pas destinées aux tunnels ferroviaires pour passagers, qui feront l'objet d'un document annexe à préparer à l'avenir par le groupe de travail.

Le groupe de travail a conclu que la meilleure méthode de protection des tunnels routiers est de mettre à disposition des recommandations pour la protection thermique des

CONCLUSION

After extensive deliberation the Working Group has determined that road tunnels should be protected from the influences of a high temperature fire according to Tables 1 and 2 above. This is necessary to provide safe evacuation of the public, working time for fire and rescue personnel, and to prevent the catastrophic collapse of the structure.

The Working Group has also acknowledged that many of the member nations already have strict guidelines for the protection of underground structures in place, and the Working Group hopes to enhance those standards by providing the following recommendations to be used as guidelines for the protection of road tunnels. These recommendations were developed through an extensive review of codes, regulations, ordinances, research and case studies of tunnel fires. These guidelines are intended to provide criteria for the protection of existing as well as new road, (highway) tunnel construction. The information provided herein, may be applicable to other types of tunnels, providing careful consideration is made as to the tunnel usage, and types of materials that are transported within the tunnels. These guidelines are not intended for passenger rail tunnels, which will be covered in a parallel document to be developed by the Working Group in the future.

The Working Group concluded that the best method of protecting road tunnels is to provide guidelines for the thermal protection of the various elements of a tunnel. This

divers éléments d'un tunnel. Ceci a été décidé par suite du fait qu'il y a tant de cas de tunnels et de types d'éléments structurels intérieurs qu'il serait impossible d'identifier chaque tunnel et de lui fournir un système approprié de protection incendie. Le Groupe de Travail a établi dans ce but des niveaux de température à deux heures pour la protection de divers matériaux et d'éléments spécifiques :

- Béton : éléments structurels murs, plafonds, murs de séparation, béton coulé sur place, etc. : Protéger la surface du béton pour une augmentation maximale de la chaleur en surface de 380 °C.
- Eléments préfabriqués en béton : y compris les segments en béton à haute tension, panneaux préfabriqués etc. : Protéger pour une augmentation maximale de la chaleur en surface de 200-250 °C.
- Les plafonds en béton seront convenablement protégés contre l'effondrement pour un minimum de deux heures avec une augmentation maximale de température en surface de 380 °C.
- La maçonnerie en briques d'argile et de cendres ne sont pas considérées comme critiques et ne nécessitent pas de protection.
- Les éléments de paroi en acier seront protégés pour une augmentation maximale de la chaleur en surface de 550 °C.
- Les joints scellés entre les segments seront protégés pour une augmentation maximale de la chaleur en surface de 200 °C.
- Les revêtements de tunnels en briques céramiques seront protégés pour une augmentation maximale de la chaleur en surface de 200 °C. (Note : l'utilisation de briques céramiques devrait être évitée dans les nouveaux tunnels).
- Les éléments de paroi en fonte seront protégés pour une augmentation maximale de la chaleur en surface de 550 °C.
- Les éléments structurels et les suspentes en acier descendant du plafond seront protégées pour une augmentation maximale de la température de 550 °C.
- Les éléments de structure en fonte et les ancrages fixés à la voûte seront protégés pour une augmentation maximale de la température en surface de 550 °C.
- Les éléments structurels et les suspentes en acier inoxydable descendant du plafond seront protégées pour une augmentation maximale de la température de 800 °C.
- Les ancrages doivent être conçus pour un facteur de sécurité de 3.5 pour la fixation. La fixation est définie comme le lien à la superstructure.
- Les ancrages en résine époxy seront protégés pour une augmentation de la température à 6 cm de la surface de 200 °C (Note : la France interdit l'utilisation d'ancrages époxy dans des environnements qui pourraient se trouver à plus de 300 °C).

was decided due to the fact that there are so many tunnel subsystems and types of interior structural elements, it would be impossible to identify each type and provide a specific fire protection system for them. Therefore the Working Group established two-hour temperature thresholds for the protection of various materials and specific elements as follows:

- Concrete: Structural elements wall, ceilings, partition walls, cast-in-place concrete etc: Protect the concrete surface for a maximum heat rise at surface of 380 °C.
- Precast concrete elements: including high strength concrete segments, precast planks etc: Protect for a maximum heat rise at surface of 200-250 °C.
- Concrete Ceilings shall be suitably protected from collapse for a minimum of two (2) hours with a maximum temperature rise at the surface of 380 °C.
- Clay brick masonry and dimension (asher) stone are not considered critical and do not need protection.
- Segmental Steel liners shall be protected at the surface for a maximum temperature rise of 550 °C.
- Leaded Joints in segmental liners shall be protected for a maximum heat rise of 200 °C.
- Ceramic fired tile finishes of tunnels shall be protected from explosive spalling to a maximum temperature rise of 200 °C. (Note the use of ceramic fired tile finishes in new tunnels should be avoided).
- Segmental Cast Iron liners shall be protected at the surface for a maximum temperature rise of 550 °C.
- Steel structural elements and ceiling hanger rods shall be protected for a maximum temperature rise of 550 °C.
- Cast Iron structural elements and ceiling hanger rods shall be protected for a maximum temperature rise of 550 °C.
- Stainless steel structural elements and ceiling hanger rods shall be protected for a maximum temperature rise of 800 °C.
- Anchorages must be designed for a minimum factor of safety of 3.5 for fixity of anchor. Fixity is described as the bond/ attachment to the substrate
- Epoxy resin anchors shall be protected for a temperature heat rise at a depth of 6 cm from the surface of 200 °C. (Note: France prohibits the use of epoxy anchors in environments that may be above 300 °C).

- Tous les ancrages époxy seront conçus avec une zone de fixation située à plus de 6 cm depuis la surface du béton ou du matériau dans lequel l'ancrage est fixé.
- Les ancrages au plomb ou comportant du plomb ne sont pas admis pour le support d'équipements structurels ou d'urgence (p.ex. clapets, ventilateurs, etc.).
- Les ancrages en cuivre, zinc ou autre matériau à bas point de liquéfaction ne sont pas admis pour le support d'équipements structurels ou d'urgence (p.ex. clapets, ventilateurs, etc.).
- Aucun matériau résistant au feu ne sera dégradé par la présence d'eau en ce qui concerne sa fixation à la superstructure ou sa résistance au feu.
- Tous les matériaux incorporés dans la structure du tunnel ou dans le tunnel seront non-toxiques et ininflammables.
- Tous les équipements d'urgence à installer seront conformes aux recommandations AIPCR et aux réglementations locales.
- Les zones d'accès/d'évacuation de secours seront conçues pour ne pas dépasser une température maximale de 40 °C.
- All epoxy anchors shall be designed with the bond zone not less than 6 cm from the surface of the concrete or material that the anchor is being installed within.
- Lead shield anchors or anchors with lead components are not permitted for structural or emergency equipment supports, (i.e. dampers, fans, etc.).
- Brass, zinc or other low melting point anchors are not permitted for structural or emergency equipment supports, (i.e. dampers, fans, etc.).
- All fireproofing materials shall not be degraded in regard to bond to the substrate or in fire resistance rating from the presence of water.
- All materials incorporated in tunnel structures or within tunnels shall be non-toxic and non-flammable.
- All emergency equipment to be installed shall conform to PIARC Guidelines and local codes, ordinances and regulations.
- Emergency access/escape areas shall be designed not to exceed a maximum temperature of 40 °C in areaways as per PIARC Guidelines and local codes, regulations and ordinances.

L'information fournie ici est destinée à servir de recommandation et reste informelle. Des mesures spécifiques pour la protection de chaque structure adaptée à chaque site doivent être prises. Toute question concernant l'information présentée ici doit être envoyée à l'Association internationale des Travaux en Souterrain Groupe 6 via son site internet à www.ita-aites.org ou à l'animateur du groupe de travail Mr. Henry A. Russell c/o Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc., via e-mail à Russell@pbworld.com.

The information provided here is intended to act as a guideline and is for informational purposes. Specific measures for the protection for each structure is site specific and must be designed on an individual basis Any inquiries in regard to the information presented here should be sent to the International Tunnel Association Working Group 6 via its web site at www.ita-aites.org or to the Animateur of the Working Group Mr. Henry A. Russell c/o Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc., via e-mail at Russell@pbworld.com.

AU SOMMAIRE DU PROCHAIN NUMÉRO (N° 325, JANVIER 2005)

La revue Routes/Roads va changer de tête en janvier 2005

Dans la rubrique Actualités, vous trouverez :

- Un article québécois « **La route verte – Le réseau cyclable national du Québec** ».
- Un article mexicain « **Méthodologie pour l'évaluation sociale des routes rurales au Mexique** ».

Dans la rubrique Dossier technique :

- Un article néerlandais « **Enquête auprès des usagers de la route** ».
- Un article finlandais « **Évaluer la gestion environnementale** ».

CONTENTS OF THE NEXT ISSUE (N° 325, JANUARY 2005)

The Routes/Roads layout and content will change from January 2005

What's news?

- Quebec « **The route verte – Quebec's National Cycling Network** ».
- Mexico « **Methodology for Social Evaluation of Rural Roads in Mexico** ».

Features

- Netherlands « **European Road User Survey** ».
- Finland « **Evaluating Environmental Management** ».