

7 CRITÈRES DE CONCEPTION POUR LA RÉSISTANCE AU FEU DES STRUCTURES

7.1 Introduction

Le présent chapitre présente les recommandations finales du Comité technique AIPCR de l'Exploitation des tunnels routiers en ce qui concerne les critères de conception pour la résistance au feu des structures des tunnels routiers.

Une coopération a été établie entre le Comité technique AIPCR de l'exploitation des tunnels routiers et l'Association internationale des travaux en souterrain (AITES). Cette collaboration a été menée par le Groupe de travail n°6 de l'AIPCR et le Groupe de travail n°6 « Réparation et entretien des ouvrages souterrains » de l'AITES.

Bien que l'ingénierie de la sécurité incendie se développe de plus en plus dans d'autres domaines comme une approche performantielle de la résistance au feu, il a été convenu entre l'AIPCR et l'AITES que cette approche n'est pour l'instant pas assez aboutie en ce qui concerne les tunnels. Par conséquent, leurs travaux conjoints dans ce domaine eurent pour objectif une approche descriptive basée sur une courbe de dimensionnement température-temps, au moins dans une première étape. Le rôle de l'AIPCR était de définir les objectifs de résistance au feu des structures des tunnels routiers : incendies de dimensionnement (principalement courbes température-temps) et temps de résistance requis. L'AITES devait traiter des techniques et des matériaux de construction qui doivent être utilisés pour répondre à ces objectifs de résistance.

Les résultats finaux de cette coopération AIPCR-AITES sont des recommandations conjointes portant à la fois sur les objectifs et sur la façon de les atteindre :

- les objectifs sont décrits dans le présent chapitre ;
- les matériaux et méthodes de construction sont décrits dans le rapport AITES intitulé « Recommandations pour la résistance au feu des structures des tunnels routiers [64].

7 DESIGN CRITERIA FOR STRUCTURE RESISTANCE TO FIRE

7.1 Introduction

This section presents the final recommendation of the PIARC Technical Committee on Road Tunnel Operation on the question of design criteria for resistance to fire for road tunnel structures.

A cooperative effort has been established between the PIARC Technical Committee on Road Tunnel Operation and the International Tunnelling Association (ITA). This collaborative effort has been conducted by PIARC Working Group No. 6 and ITA Working Group 6 “Repair and Maintenance of Underground Structures”.

Although fire safety engineering is being applied more and more in other fields as a performance-based approach to fire resistance, it has been agreed between PIARC and ITA that such an approach is currently not mature enough with regard to tunnels. Consequently, this joint effort was aimed at a prescriptive time-temperature curve design approach, at least as a first step. The role of PIARC was to define the objectives of resistance to fire of road tunnel structures: design fires (mainly time-temperature curves) and required resistance times. ITA dealt with the construction techniques and materials to be used to meet these resistance objectives.

The final outcome of the PIARC-ITA collaboration are joint recommendations on both the objectives and the way to meet them:

- The objectives are described in this section
- The materials and construction methods are described in the ITA report titled “Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels” [64].

7.2 Travaux antérieurs de l'AIPCR

Le Comité technique de l'Exploitation des tunnels routiers a publié des documents sur la résistance au feu des structures dans ses rapports pour les Congrès mondiaux de la route de Vienne (1979) [21], Sydney (1983) [30], Bruxelles (1987) [31], Marrakech (1991) [56] et Montréal (1995) [1]. Ce sujet a en outre été traité dans un article de Routes/Roads (1991) [57] ainsi que dans le rapport de 1999 [2].

Vienne 1979

La résistance au feu des structures est mentionnée dans le Chapitre IV « Exploitation » :

- la température et son développement constituent le seul critère pour la résistance au feu des structures ;
- les caractéristiques de résistance à la température des matériaux composant les éléments structurels ont une importance décisive. Quelques exemples sont donnés ;
- on présente les résultats d'un essai autrichien réalisé avec un incendie de faible ampleur ;
- les températures dans la gaine d'air vicié sont examinées ;
- on donne des recommandations pour les éléments structurels, les équipements électriques et mécaniques, la détection des incendies et la lutte contre le feu.

Sydney, 1983

Une très grande attention est portée à la prévention et la détection de l'incendie, la lutte contre le feu et l'évacuation. Mais le Chapitre V.2.6.2 « Protection de l'ouvrage » mentionne aussi la relation entre le transport des matières dangereuses et les risques accrus des incendies. Une recommandation est donnée pour un revêtement résistant au feu et un renforcement des armatures afin de diminuer les dégâts causés par un incendie.

Bruxelles, 1987

Une conclusion intéressante est présentée : « Dans la pratique, tout, dans un tunnel, peut contribuer à la sécurité ». La recommandation suivante est également donnée : « Le même niveau de sécurité doit donc être assuré pour les différentes structures et les différents équipements ». Aucune autre recommandation n'est donnée sur la résistance au feu des structures et des équipements.

7.2 Previous Work by PIARC

The Technical Committee on Road Tunnel Operation has published material on structure resistance to fire in reports to World Road Congresses in Vienna (1979) [21], Sydney (1983) [30], Brussels (1987) [31], Marrakech (1991) [56] and Montreal (1995) [1]. In addition, the subject was addressed in an article in Routes/Roads (1991) [57] and in the 1999 report [2].

Vienna 1979

Structural fire resistance is mentioned in Chapter IV "Operation":

- the temperature and its development is the only criterion for structural fire resistance;
- the temperature strength characteristics of the structural element materials are of decisive importance. Some examples are given;
- the results of an Austrian test with a small fire are shown;
- temperatures in the exhaust air duct are considered;
- recommendations for structural, electrical and mechanical equipment, fire detection and fire-fighting are given.

Sydney, 1983

A lot of attention is given to fire prevention, detection, fighting and evacuation. However, in Chapter V.2.6.2 "Protection of the Tunnel Itself", the relationship between dangerous goods transport and the increased risk of fires is mentioned. A recommendation is given for a fire-resistant lining and an increased amount of reinforcement to reduce the damage caused by a fire.

Brussels, 1987

An interesting conclusion is shown in this paper: "in practice, everything in the tunnel can contribute to safety". In addition the following recommendation is given: "Thus the same level of safety should be provided for the different structures and installations". No other recommendation on the fire resistance of the structures and installations is given.

Marrakech, 1991

Le lien avec la structure est reconnu et traité dans les chapitres concernant aussi bien l'« Analyse des risques liés aux matières dangereuses » que les « Essais et exercices d'incendie ». Aucune recommandation spécifique n'est donnée quant à la résistance de la structure ou des équipements.

Montréal, 1995

Le Chapitre IV.3.3 « Dispositions permettant de limiter les conséquences d'un accident » (impliquant des matières dangereuses) comporte diverses recommandations ainsi que des dispositions passives et actives sur la résistance au feu des structures et des installations. Le chapitre V.1 « Objectifs de maîtrise des incendies et des fumées » mentionne certains éléments de structure et équipements et leur comportement en cas d'incendie.

Article dans Routes/Roads, 1991

Outre les rapports mentionnés ci-dessus, le Comité a publié un article très complet en 1991 sur la protection des structures, des circuits électriques et des équipements. Il fournit des informations sur les courbes température-temps les plus appropriées pour caractériser des incendies en tunnel. Il recommande ensuite des objectifs de résistance au feu pour les structures en fonction du type de tunnel et les méthodes.

7.3 Contexte

On peut résumer de la façon suivante les objectifs de la résistance au feu des structures de tunnels :

- les usagers se trouvant à l'intérieur du tunnel doivent pouvoir procéder à leur propre évacuation (auto-évacuation) ou pouvoir être aidés pour gagner un endroit sûr ;
- les opérations de secours doivent être possibles dans des conditions sûres ;
- des mesures de protection doivent être prises contre l'effondrement de la structure et la perte de biens tiers.

La sécurité des usagers du tunnel et du personnel de secours reste l'objectif principal.

La protection des biens signifie que le tunnel ne doit pas s'effondrer pendant une durée spécifiée. Il est particulièrement important d'éviter tout effondrement de la structure pour les tunnels immergés et les tunnels situés sous des bâtiments. La protection des biens comprend également les coûts associés aux interruptions du trafic pendant les travaux de reconstruction.

Marrakech, 1991

The link to the structure is recognised in both the chapters on "Analysis of the Risk of Hazardous Materials" and "Fire Tests and Trial Exercises". No specific recommendation is given on the fire resistance of the structure or installations.

Montreal, 1995

Chapter IV.3.3 "Provisions Limiting the Consequences of an Accident" (involving dangerous goods) contains various recommendations, passive and active provisions, on the fire resistance of structures and installations. Chapter V.1 "Objectives of Fire and Smoke Control" mentions certain structure and installation items and their behaviour during a fire.

Article in Routes/Roads, 1991

Besides the aforementioned reports, a comprehensive article was published by the Committee in 1991 on the protection of structures, electrical circuits and equipment. It gives information on the temperature-time curves most appropriate for characterising tunnel fires. It then recommends fire resistance objectives for the structures depending on the type of tunnel, and methods to meet them. Recommendations are also given on the fire resistance of power supply and other various pieces of equipment.

7.3 Background

The objectives for fire resistance of tunnel structures can be summarised as follows:

- people inside the tunnel shall be able to self-evacuate (self-rescue) or be assisted to a safe place;
- rescue operations shall be possible under safe conditions;
- protective measures shall be taken against collapse of tunnel structure and loss of property to third parties.

The safety of tunnel users and rescue personnel is the main objective.

Protection of property means that the tunnel structure must not collapse during a specified time period. Avoiding structural collapse is especially important for submerged tunnels and tunnels under buildings. Protection of property also comprises the societal costs associated with traffic interruptions during road reconstruction activities.

La protection de l'environnement s'applique à des cas particuliers, tels que le dégagement de gaz de combustion toxiques ou les effets secondaires causés par l'effondrement de la structure. La protection de l'environnement est prise en compte surtout lors de la conception vis-à-vis de la réaction au feu des matériaux de construction des tunnels et n'est pas abordée dans ce chapitre.

7.4 Critères de conception

Un critère préliminaire de base qui doit être pris en compte pour toute structure de tunnel est qu'il ne doit exister aucun risque d'effondrement progressif : la rupture locale d'un élément quelconque ne doit pas conduire à une charge accrue pour une autre partie de la structure, susceptible de causer sa rupture.

7.4.1 Courbes température-temps

Plusieurs courbes température-temps existent à ce jour. La figure 7.1 donne les courbes ISO 834, RWS, ZTV-Tunnel et une courbe d'hydrocarbures modifiée, notée HC_{inc} (en anglais) ou HCM (en français), dans laquelle les températures sont multipliées par un facteur 1300/1100 par rapport à la courbe d'hydrocarbures (HC) de l'Eurocode 1 Partie 2-2.

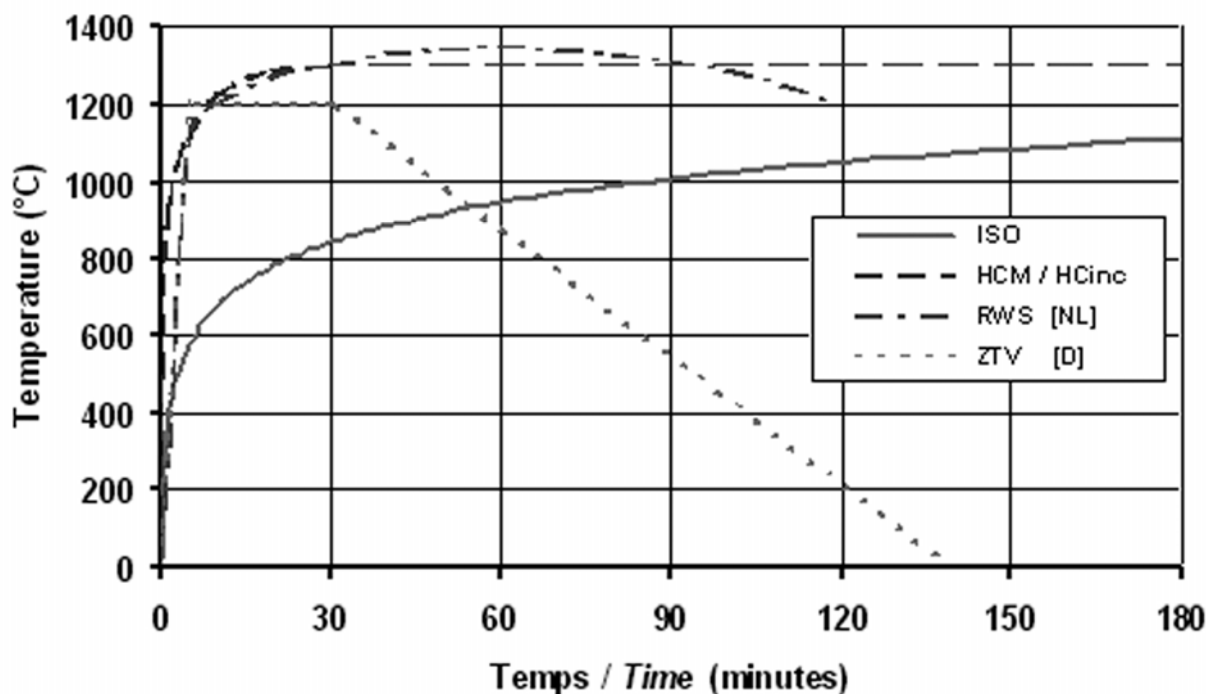


Figure 7.1 - Courbes température-temps ZTV, RWS, HCinc (ou HCM) et ISO

Protection of environment would apply to special cases such as the release of toxic combustion gases or secondary effects caused by a collapse of the structure. Protection of environment would mostly likely be taken care of in the design for reaction to fire of materials used in tunnel construction and is not included in this section.

7.4 Design Criteria

A preliminary and basic criterion to be met by any tunnel structure is that there should not be any risk of progressive collapse: the local failure of any element should not lead to an increased load on another part of the structure that may cause its failure.

7.4.1 Time-Temperature Curves

There are several time-temperature curves proposed to date. Figure 7.1 sketches the ISO 834, RWS, ZTV-Tunnel and a modified Hydrocarbon curve, HC_{inc} , in which the temperatures are multiplied by a factor of 1300/1100 from the hydrocarbon (HC) curve of Eurocode 1 Part 2-2.

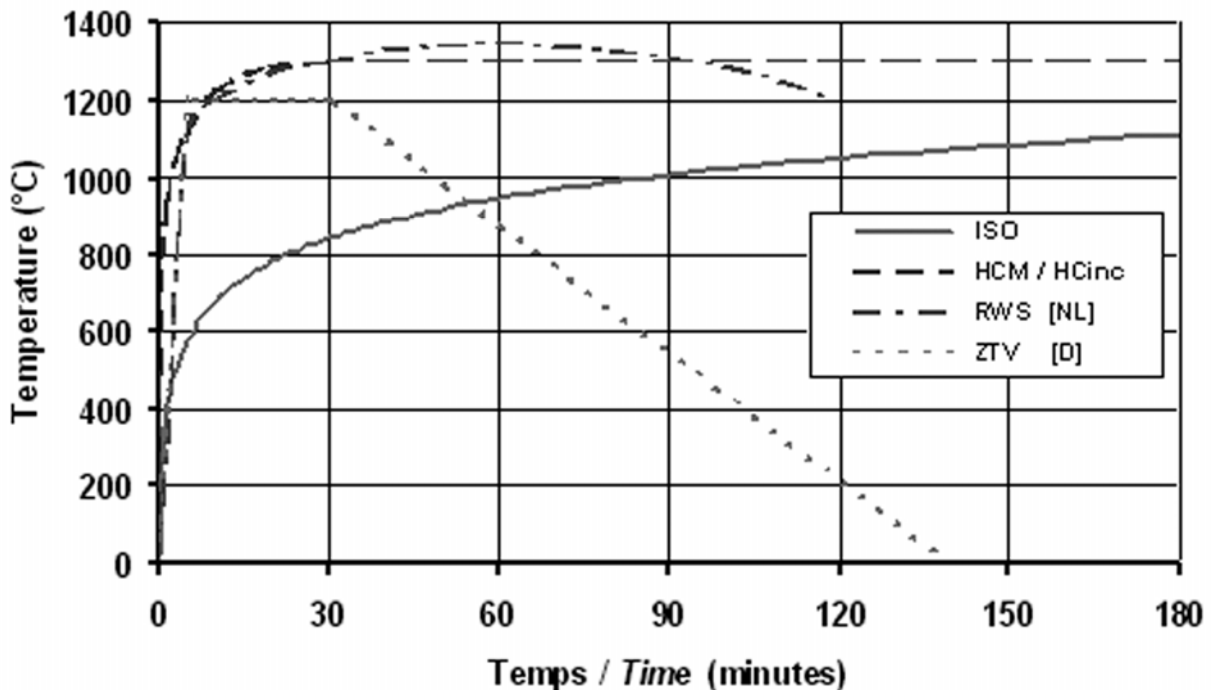


Figure 7.1 - Temperature versus time curves for ZTV, RWS, HC_{inc} and ISO standards

Les recommandations pour la conception des structures doivent prendre en compte la courbe température-temps en fonction des événements susceptibles de se produire dans le tunnel. Les stades initiaux de développement de l'incendie, suivant la première partie de la courbe, doivent être utilisés pour l'évacuation pendant le temps prévu pour celle-ci. Il ne doit se produire aucun effondrement pendant cette période dans les zones où peuvent se trouver des usagers ou des sauveteurs.

Dès les premiers stades d'un incendie, il peut se produire un écaillage de la structure, mais il n'a été fait état d'aucun incident au cours duquel l'écaillage a eu des conséquences graves pour le personnel luttant contre le feu, bien qu'il puisse provoquer une détérioration rapide de la structure. En revanche, la chute d'équipements tels que ventilateurs, panneaux ou feux, soit du plafond du tunnel soit de ses parois, constitue un danger sérieux lors de l'intervention des services de lutte contre le feu. Cette question de résistance au feu a été traitée dans le rapport AIPCR de 1999 [2], qui précise :

“Dans tous les cas [...], l'exigence minimale est que des équipements lourds ne doivent pas tomber pendant que des usagers en cours d'évacuation ou des personnels de secours se trouvent dans le tunnel. Ceci signifie qu'aucun élément lourd ne doit tomber s'il est exposé à une température de 400 à 450 °C pendant le temps nécessaire pour combattre l'incendie (dans un tunnel, de telles températures peuvent produire un niveau de rayonnement d'environ 5 kW/m², qui est le maximum tolérable pour les pompiers). »

Des abris ne doivent être ménagés dans un tunnel que s'il existe un cheminement permettant aux sauveteurs de rejoindre les usagers qui y attendent et de les aider à gagner l'extérieur. Si de tels abris existent, ils doivent présenter une résistance au feu d'environ deux heures.

On doit prendre en considération la durée totale définie par la courbe. Par exemple, en France, on prévoit actuellement une durée de deux heures pour l'intervention des pompiers ; après deux heures, le tunnel est considéré comme n'étant plus sûr. Si le tunnel se trouve sous un bâtiment, ou si la protection des biens est une préoccupation importante, une durée plus longue peut être envisagée.

7.4.2 Recommandations

Le Tableau 7.1 présente les recommandations proposées pour les critères de dimensionnement. Ce tableau opère une distinction en fonction du type de trafic (et par conséquent de la puissance thermique possible) et des conséquences d'une rupture de la structure due à l'incendie. Par exemple, lorsque les conséquences sont inacceptables (par exemple tunnel immergé ou creusé dans un sol instable), il est nécessaire de prévoir une protection contre un incendie très grave ; lorsque les conséquences sont limitées (par exemple tunnel creusé dans un terrain stable), aucune protection n'est nécessaire.

Recommendations for design of the structure should consider the time-temperature curve with regard to the possible events within the tunnel. The early stages of the fire development, hence the first part of the curve, will be taken into account for escape during the time conceived for evacuation. There should be no collapse during this period that can affect the zones where there may be users or rescuers.

Spalling of the structure can occur from the early stages of a fire but no incidents have been reported where spalling has had major consequences for fire-fighters, although it can cause rapid deterioration of the structure. On the other hand, a concern at the time of fire service intervention would be the collapse of items such as jet fans, signs or lights from the tunnel ceiling or walls. This question of fire resistance has been addressed in the PIARC 1999 report [2], which states:

“In all cases [...], the minimum requirement is that heavy equipment should not fall down when evacuating users or rescue personnel are in the tunnel. This means that no heavy item must fall under exposure to temperatures of 400-450°C during the time necessary to fight fire (in a tunnel, such temperatures can produce a radiation level of about 5 kW/m², which is the maximum tolerable value for firemen).”

Shelters should only be provided in a tunnel if there is a way for rescuers to reach the users waiting in the shelter and assist them to the outside. If such shelters were available, then a fire resistance of approximately two hours would be required.

The overall duration defined by the curve will need to be considered. For instance, in France, two hours is currently allowed for fire brigade intervention; after two hours the tunnel is considered to be unsafe. If the tunnel is under a building, or protection of property is an important issue, then a longer time may be considered.

7.4.2 Guidelines

The proposed guidelines for design criteria are presented in Table 7.1. 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. For example, when the consequences are unacceptable (e.g. a submerged tunnel or one in unstable ground), protection against a very severe fire is required; when the consequences are limited (e.g. a tunnel in stable ground), no protection is needed.

Tableau 7.1 - Recommandations proposées

| Type de trafic | Structure principale | | | | Structures secondaires (4) | | | |
|-----------------------------------|--|---|--------------------------|-------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|
| | Immergée ou sous/dans une superstructure | Tunnel en terrain instable | Tunnel en terrain stable | Tranchée couverte | Gaines de ventilation (5) | Issues de secours vers l'air libre | Issues de secours vers un autre tube | Abris (6) |
| Voitures/ Camionnettes | ISO 60 min | ISO 60 min | Voir note (2) | Voir note (2) | ISO 60 min | ISO 30 min | ISO 60 min | ISO 60 min |
| Camions/ Citernes | RWS/HC _{inc} 120 min (1) | RWS/HC _{inc} 120 min (1) | Voir note (3) | Voir note (3) | ISO 120 min | ISO 30 min | RWS/HC _{inc} 120 min | RWS/HC _{inc} 120 min (7) |

Notes

- (1) Une durée de 180 min peut être nécessaire pour une densité de trafic très importante de camions transportant des matières combustibles
- (2) La sécurité n'est pas un critère et ne demande aucune résistance au feu (autre que éviter un effondrement progressif). Prendre en compte d'autres objectifs peut conduire aux exigences suivantes :
ISO 60 min dans la plupart des cas
pas de protection du tout si une protection de la structure serait trop onéreuse comparée aux coûts et inconvénients de travaux de réparation après un incendie (par exemple couverture légère pour une protection contre le bruit)
- (3) La sécurité n'est pas un critère et ne demande aucune résistance au feu (autre que éviter un effondrement progressif). Prendre en compte d'autres objectifs peut conduire aux exigences suivantes :
RWS/HC_{inc} 120 min si une forte protection est requise pour la conservation des biens (par ex. tunnel sous un bâtiment) ou à cause d'une grande influence sur le réseau routier
ISO 120 min dans la plupart des cas, lorsque cela permet de limiter les dommages sur les biens pour un coût raisonnable
aucune protection du tout si une protection de la structure serait trop onéreuse comparée aux coûts et inconvénients de travaux de réparation après un incendie (par exemple couverture légère pour une protection contre le bruit)
- (4) Autres structures secondaires : à définir au cas par cas
- (5) Dans le cas d'une ventilation transversale
- (6) Les abris doivent être reliés avec l'extérieur
- (7) Une durée plus longue peut être envisagé si le trafic de camions transportant des matières combustibles est très important et si l'évacuation des abris n'est pas possible dans les 120 minutes.

Le tableau 7.1 utilise la courbe ISO et l'une ou l'autre des courbes RWS ou HCinc pour définir les critères de dimensionnement pour différentes circonstances. Le Comité technique AIPCR de l'exploitation des tunnels routiers estime que les courbes RWS et HCinc correspondent à des niveaux très similaires de résistance au feu, et il ne faut utiliser que l'une de ces deux courbes. Le sous-comité ISO TC 92/SC2 pense également qu'il est indifférent d'utiliser l'une ou l'autre, mais que la courbe HCinc est un choix plus naturel et meilleur s'il faut n'en retenir qu'une. Le Comité AIPCR recommande actuellement que n'importe laquelle de ces courbes soit utilisée, les résultats étant très similaires.

Table 7.1 - Proposed recommendations

| Traffic Type | Main Structure | | | | Secondary Structures (4) | | | |
|-----------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------|--------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| | Immersed or Under/Inside Superstructure | Tunnel in Unstable Ground | Tunnel in Stable Ground | Cut & Cover | Air Ducts (5) | Emergency exits to open air | Emergency exits to other tube | Shelters (6) |
| Cars/ Vans | ISO 60 min | ISO 60 min | See Note (2) | See Note (2) | ISO 60 min | ISO 30 min | ISO 60 min | ISO 60 min |
| Lorries/ Tankers | RWS/HC _{inc} 120 min (1) | RWS/HC _{inc} 120 min (1) | See Note (3) | See Note (3) | ISO 120 min | ISO 30 min | RWS/HC _{inc} 120 min | RWS/HC _{inc} 120 min (7) |

Notes

- (1) 180 min may be required for very heavy traffic density of lorries carrying combustible goods
- (2) Safety is not a criterion 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 criterion 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 inexpensive way to limit property damage
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-specific basis
- (5) In case of transverse ventilation
- (6) Shelters should be connected to the open air
- (7) A longer time may be considered if there is a very heavy volume of lorries carrying combustible goods and evacuation from the shelters is not possible within 120 min

Table 7.1 uses the ISO curve and either the RWS or the HC_{inc} curve to define design criteria for different circumstances. The PIARC technical Committee on Road Tunnel Operation 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. The sub-Committee ISO TC 92/SC2 also believes that whichever one you use has no impact, but considers that the HC_{inc} curve is a more natural, better choice if only one is kept. The PIARC Committee currently recommends that any of these curves can be used, as the results will be very similar.

7.5 Activités futures

7.5.1 Introduction des courbes d'incendie en tunnel dans les normes

Il a été envisagé de proposer d'inclure, sous une certaine forme, les résultats des travaux conjoints présentés ici dans des normes telles que les « Eurocodes structurels » du CEN/TC 250, les normes « Essais d'incendie » du CEN/TC 127 et les normes « Ingénierie de la sécurité contre les incendies » de l'ISO/TC 92/SC4. Cela peut constituer des travaux futurs potentiels pour le Comité technique AIPCR de l'Exploitation des tunnels routiers.

7.5.2 Ingénierie de la sécurité incendie

Aussi bien les sous-comités ISO/TC 92/SC2 et SC4 que plusieurs membres du Groupe de travail n°6 du comité AIPCR C3.3 et du Groupe de travail n°6 de l'AITES, ont mentionné que chaque tunnel est unique en ce qui concerne le développement d'un scénario d'incendie. Lorsque l'on détermine les caractéristiques particulières de l'incendie, de nombreux paramètres sont importants, parmi lesquels :

- type et densité du trafic, donc la charge combustible et sa distribution (zone), ainsi que l'extension possible de l'incendie ;
- configuration de la section transversale, longueur et pente du tunnel ;
- conception et capacité de la ventilation du tunnel ;
- possibilité d'utiliser des mesures actives telles que sprinklers ou brouillard d'eau ;
- rugosité de la surface du tunnel et changements de section transversale ;
- inertie thermique des parois du tunnel.

En raison de températures très élevées, il peut y avoir un risque de surdimensionner les tunnels si on applique certaines courbes indépendamment des paramètres réels du tunnel. Les nouveaux principes d'ingénierie de la sécurité doivent être explorés et développés pour définir des incendies de dimensionnement plus appropriés pour les tunnels à venir.

7.5 Future Activities

7.5.1 Introduction of Tunnel Fire Curves into Standards

Consideration has been given to proposing the inclusion of some form of the results of the collaborative work presented here in standards such as the CEN/TC 250 “Structural Eurocodes”, the CEN/TC 127 “Fire Tests” and the ISO/TC 92/SC4 “Fire Safety Engineering”. Such liaisons are potential future work for the PIARC Technical Committee on Road Tunnel Operation.

7.5.2 Fire Safety Engineering

Both sub-committees ISO/TC 92/SC2 and SC4, as well as several members of PIARC C3.3 Working Group No. 6 and ITA Working Group 6 have mentioned that every tunnel is unique with regard to the development of a fire scenario. When determining the specific fire size numerous parameters are of importance such as:

- type and density of traffic, and consequently the fire load and its distribution (area), as well as the possible fire spread
- cross-sectional configuration, length and inclination (slope) of the tunnel
- ventilation design and ventilation capacity of the tunnel
- possible use of active measures such as sprinklers or water mist

- roughness of the tunnel surface and changes in cross section
- thermal inertia of the tunnel boundaries.

Due to very high temperatures, there might be a risk of over designing tunnels when applying some curves independent of the real tunnel parameters. New safety engineering principles should be explored and developed to establish more appropriate design fires for tunnels in the future.