

# II. RISQUE INCENDIE ET INCENDIES DE DIMENSIONNEMENT

## II.1 Introduction

Ce chapitre traite de la fréquence et de l'intensité des incendies dans les tunnels routiers. De récents résultats tirés d'évaluations statistiques (II.3) et d'expérimentations d'incendies (II.4) sont utilisés pour actualiser les travaux antérieurs de l'AIPCR.

L'un des buts importants de ce chapitre est de spécifier les incendies de dimensionnement vis-à-vis de :

- l'ingénierie du système de ventilation (par exemple, production de chaleur, gaz toxiques et fumée),
- la formation des personnels devant affronter les incendies en tunnel routier (par exemple, pompiers, personnel de contrôle des tunnels).

Il faut prendre en compte le transport des marchandises dangereuses dans le tunnel quand il est autorisé (par exemple, camions citernes). Comme indiqué dans l'introduction générale au présent rapport, la façon de décider dans quelles conditions ce type de transport doit être autorisé n'est pas examinée ici. Le Comité AIPCR des Tunnels routiers a mis en place un groupe de travail spécialisé pour traiter de cette question. Il a aussi lancé un projet de recherche conjoint sur le sujet avec l'Organisation de Coopération et de Développement économiques (OCDE). Il sera rendu compte de ces travaux de façon séparée. Le présent rapport considère la décision d'autoriser ou d'interdire les marchandises dangereuses comme une donnée et propose des incendies de dimensionnement et des mesures de protection adaptées à chaque cas.

Ce chapitre traite également des scénarios d'incendie qui doivent être utilisés pour :

- l'ingénierie de la structure du tunnel (par exemple, conception du ferrailage des éléments en béton, éviter des faiblesses structurelles des tunnels sous-fluviaux),
- l'essai d'incendie des éléments structurels (par exemple, panneaux résistant au feu),
- l'essai d'incendie des équipements du tunnel (par exemple, accélérateurs, précipitateurs électrostatiques, éclairage, câbles).

Les futurs travaux sur la résistance au feu des structures seront conduits conjointement avec l'AITES (Association internationale des Travaux en Souterrain), car l'AITES traite de l'ingénierie de la structure des tunnels.

De nombreux pays ont inclus dans leurs recommandations des règles de conception visant la sécurité incendie ou travaillent actuellement sur la préparation de telles règles. La plus grande part de ces travaux est fondée sur le rapport du Comité AIPCR des Tunnels routiers présenté à Bruxelles en 1987 [19]. Depuis, des progrès ont été accomplis. Des essais d'incendie, EUREKA en Norvège [20] et Memorial Tunnel aux États-Unis [22], ont été réalisés, ainsi que des incendies contrôlés de quelques véhicules dans de nouveaux tunnels avant leur ouverture à la circulation (en France et en Espagne [23 ; 24]).

# II. FIRE RISK AND DESIGN FIRES

## II.1 Introduction

This section deals with frequencies and intensities of fires in road tunnels. Recent results of statistical evaluations (chapter II.3) and fire experiments (chapter II.4) are used to update existing PIARC work.

One important aim of this section is to specify design fires with regard to:

- the engineering of the ventilation system (e.g. heat, toxic gas and smoke production rates),
- the training of people dealing with fires in road tunnels (e.g. fire brigades, supervising staff at tunnel sites).

This must take into account transport of dangerous goods through the tunnel (e.g. petrol tankers) when allowed. As stated in the general introduction of this report, the way to decide under which conditions such transport should be allowed is not examined here. The PIARC Committee on Road Tunnels has established a specialised working group to deal with this issue. It has also launched a joint research project on this subject with the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). These works will be reported separately. This report takes the decision concerning authorisation or banning of dangerous goods as a data and proposes design fires and protective measures adapted to each case.

This section also deals with fire scenarios which should be used with regard to:

- the engineering of the tunnel structure (e.g. layout of the reinforcement of concrete elements, avoidance of structural weakness for tunnels beneath rivers),
- the fire testing of structural elements (e.g. fire-resistant panels), and
- the fire testing of tunnel equipment (e.g. jet fans, electrostatic precipitators, lighting, cables).

Further work on fire resistance of structures will be carried out together with the International Tunnelling Association (ITA), because ITA is dealing with the structural engineering of tunnels.

Several countries have included principles for a fire-safe design in their tunnelling recommendations or are working on the preparation of such principles. Much work is based on the report of the PIARC Committee on Road Tunnels presented at Brussels in 1987 [19]. Since then further advances have been achieved. The EUREKA fire tests in Norway [20] and the Memorial Tunnel tests in the United States [22] have been performed, as well as a controlled burning of some cars in newly constructed tunnels (in France and Spain [23; 24]) before their opening to traffic.

Ces expériences ont permis d'acquérir des connaissances supplémentaires sur les modèles de mécanique des fluides et les simulations numériques. Ces travaux sont encore en cours. Aussi ce chapitre ne peut-il comporter que des résultats intermédiaires sur les risques d'incendie et les incendies de dimensionnement.

Au moment de la compilation des chapitres suivants, il est apparu qu'il existe des rapports détaillés sur les incendies dans les tunnels. Les descriptions des conditions que les incendies de dimensionnement doivent remplir (par exemple, comment tester la résistance à la chaleur des installations techniques des tunnels routiers) sont, elles, beaucoup plus rares. Les futurs travaux de l'AIPCR devraient donc se concentrer davantage sur des scénarios d'incendie appropriés et, ensuite, définir des incendies de dimensionnement pour respecter ces scénarios (par exemple, en vue de réaliser des essais ou la ventilation).

## **II.2 Travaux antérieurs de l'AIPCR**

L'AIPCR a réalisé un travail important sur la ventilation dans les tunnels routiers. Initialement, ce travail était axé sur la dilution des gaz d'échappement, afin de limiter les niveaux de CO et d'opacité. Le désenfumage a été abordé pour la première fois au Congrès de Tokyo en 1967, suite aux essais dans le tunnel de l'Ofenegg (Suisse) [25]. Des recommandations plus précises furent présentées dans les rapports de Vienne (1979) [26], de Sydney (1983) [27] et principalement de Bruxelles (1987) [19]. Ce dernier synthétise les données sur la chaleur et la fumée générées par un incendie, et sur le mouvement de la fumée dans le tunnel selon le courant d'air longitudinal et l'intensité de l'incendie. De nombreux pays [28] utilisent toujours ces informations comme base de conception de leurs systèmes de désenfumage.

Des tentatives ont également été faites pour déterminer la fréquence des incendies et évaluer leurs causes. Des mesures supplémentaires, comme le contrôle des systèmes de ventilation, l'utilisation d'extincteurs et de sprinklers, ont été présentées dans les mêmes rapports et dans les suivants [18 ; 17]. Les pratiques actuelles pour la protection des structures et des équipements contre les incendies ont été rassemblées et publiées en 1991 [51]. Des statistiques sur les pannes, les accidents et les incendies dans les tunnels ont souvent été publiées par le Comité AIPCR des Tunnels routiers, la dernière fois dans [33].

## **II.3 Fréquence des incendies**

Ce sont généralement les véhicules empruntant le tunnel qui sont impliqués dans les incendies ; les principales causes sont :

- des défauts électriques (le plus souvent pour les véhicules légers),
- la surchauffe des freins (selon des statistiques françaises [29], environ 60 à 70 % des incendies impliquant des poids lourds),
- d'autres défauts conduisant à ce qu'un véhicule prenne feu sans cause extérieure.

D'autres causes bien moins fréquentes sont citées :

- collisions,
- défauts techniques des équipements du tunnel (qui prennent feu d'eux-mêmes),
- travaux d'entretien dans les tunnels.

Further knowledge was gained by experiments with fluid mechanics models and CFD computer simulations. This work is still in progress. So this section can only give interim results on fire risk and design fires.

When compiling the following chapters it showed up that there are detailed reports on tunnel fires. Descriptions of requirements that design fires should fulfil (e.g. testing the heat resistance of technical installations in road tunnels) are far more rare. Future PIARC work therefore should focus more on the definition of relevant fire scenarios and thereafter specify design fires to cover these scenarios (e.g. testing purposes, ventilation purposes).

## **II.2 Previous work by PIARC**

Important work has been done by PIARC on the ventilation of road tunnels. Initially this was mainly directed towards the dilution of exhaust gases, in order to limit the CO and opacity levels. The issues of smoke control were approached first at the Tokyo Congress in 1967, following the fire tests in the Ofenegg tunnel (Switzerland) [25]. More accurate recommendations were given in the Vienna (1979) [26], Sydney (1983) [27] and principally Brussels (1987) [19] reports. This last summarises data on smoke and heat generation from a fire, and on smoke movement along the tunnel according to the longitudinal airflow and fire intensity. This information is still used as a basis to design smoke removal systems in many countries [28].

Also attempts were made to derive fire frequencies and to evaluate the causes of fire events. Further countermeasures like control of the ventilation system, use of fire extinguishers and sprinklers were discussed in the same and further reports [18; 17]. Current practice for fire protection of structures and equipment was reviewed and published in 1991 [51]. Statistics on breakdowns, accidents and fires in tunnels have often been published by the PIARC Committee on Road Tunnels, the last time in [33].

## **II.3 Frequency of fires**

Fires in road tunnels generally concern vehicles using the tunnel and are caused mainly by:

- electrical defects (most frequent for light vehicles),
- brake overheating (according to French statistics [29] in about 60% to 70% of the fire events for lorries),
- other defects leading to the self-ignition of a vehicle.

Other causes are mentioned but are far less frequent:

- collisions,
- technical defects (self-ignition) of tunnel equipment, and
- maintenance work in tunnels.

Cependant, la plupart des incendies sont provoqués par la circulation traversant le tunnel et non par les équipements du tunnel ou des travaux d'entretien. Certains des incendies les plus graves connus à ce jour ont démarré à la suite d'accidents (par exemple, collisions avant-arrière).

En théorie, la fréquence des incendies dans les tunnels est liée à la longueur du tunnel, la densité de circulation, le contrôle de la vitesse et la pente de la route. Cela doit être pris en compte lors de la comparaison de différents tunnels. Par conséquent, la fréquence des incendies est évaluée non seulement en nombre par tunnel, mais également en nombre par véh x km pour incorporer les effets globaux de la longueur du tunnel et de la densité de circulation.

Bien que de nombreux incendies dans les tunnels soient connus, il n'existe que des statistiques limitées couvrant totalement un intervalle de temps (par exemple, une année civile). Les taux d'occurrences et d'incendies pour 45 tunnels sont donnés, dans la limite des données disponibles, aux tableaux 2.3.1 et 2.3.2.

Les taux sont calculés selon l'exemple ci-dessus du Tunnel de l'Elbe [30] :

- période d'observation : 2 ans
- longueur du tunnel (avec bretelles) : 3,3 km
- nombre de véhicules traversant le tunnel :  $37 \cdot 10^6$  véh./an
- pourcentage de poids lourds : 15 %
- nombre d'événements concernant des voitures particulières pendant la période d'observation : 13
- nombre d'événements concernant des poids lourds durant la période d'observation : 9

A partir de ces données, des taux d'incendie exprimés en termes de cas d'incendie par véh x km ont été calculés pour le Tunnel de l'Elbe à Hambourg (Allemagne) :

- voitures particulières
 
$$VL = \frac{13}{2 \times 37 \times 10^6 \times (1 - 0,15) \times 3,3} \cdot \frac{\text{cas}}{\text{véh.} \times \text{km}}$$

$$VL = 6,3 \text{ cas par } 10^8 \text{ véh} \times \text{km}$$
- véhicules lourds
 
$$PL = \frac{9}{2 \times 37 \times 10^6 \times 0,15 \times 3,3} \times \frac{\text{cas}}{\text{véh.} \times \text{km}}$$

$$PL = 24,6 \text{ cas par } 10^8 \text{ véh} \times \text{km}$$
- tous véhicules confondus
 
$$VL + PL = \frac{13 + 9}{2 \times 37 \times 10^6 \times 3,3} \times \frac{\text{cas}}{\text{véh.} \times \text{km}}$$

$$VL + PL = 9,0 \text{ cas par } 10^8 \text{ véh} \times \text{km}$$

Most fires, however, are generated by the traffic passing through a tunnel and not by tunnel equipment or maintenance work. So-me of the most serious fires known yet started due to accidents (e.g. front-back-collisions).



Photo 2.1 - Fire following an accident in the Velsen Tunnel (Netherlands) in 1978

*Photo 2.1 - Incendie à la suite d'un accident dans le Tunnel de Velsen (Pays-Bas) en 1978*

In theory the frequency of tunnel fires is related to items like tunnel length, traffic

density, speed control and slope of the road. This has to be accounted for when comparing different tunnels. Therefore the frequency of fire is rated not only by number per tunnel but also by number per vehicles x kilometres to include the gross effects of tunnel length and traffic density.

Although many fires in tunnels are known there are only limited statistics covering a time interval (e.g. a calendar year) completely. Number of occurrences and fire rates from 45 tunnels are given in tables 2.3.1 and 2.3.2 as far as available.

Rates are calculated according to the example given beneath for the Elb Tunnel [30]:

- observation period 2 years
- tunnel length (with ramps) 3.3 km
- number of vehicles passing the tunnel  $37 \cdot 10^6$  veh./year
- portion of heavy good vehicles 15%
- number of events with passenger vehicles in the observation period 13
- number of events with heavy good vehicles in the observation period 9

From these data the rates of fire expressed as cases of fire per vehicle x kilometre were calculated for the Elb Tunnel in Hamburg, Germany:

- passenger vehicles

$$PV = \frac{13}{2 \times 37 \times 10^6 \times (1 - 0.15) \times 3.3} \times \frac{\text{cases}}{\text{veh.} \times \text{km}} \quad PV = 6.3 \text{ cases per } 10^8 \text{ veh.} \times \text{km}$$

- heavy vehicles

$$HGV = \frac{9}{2 \times 37 \times 10^6 \times 0.15 \times 3.3} \times \frac{\text{cases}}{\text{veh.} \times \text{km}} \quad HGV = 24.6 \text{ cases per } 10^8 \text{ veh} \times \text{km}$$

- all vehicles together

$$PV + HGV = \frac{13 + 9}{2 \times 37 \times 10^6 \times 3.3} \times \frac{\text{cases}}{\text{veh.} \times \text{km}} \quad PV + HGV = 9.0 \text{ cases per } 10^8 \text{ veh} \times \text{km}$$

Table 2.3.1 - Occurrence des incendies dans des tunnels urbains de plusieurs pays [18 ; 21 ; 29 ; 30 ; 31 ; 32 ; 33]

Pays	Tunnel	Longueur [m]	Années observées	Trafic moyen annuel [10 <sup>6</sup> véh/an]	Cas d'incendies					
					Voitures particulières		Poids lourds		Tous véhicules	
					nombre	taux [10 <sup>8</sup> véh x km]	nombre	taux [10 <sup>8</sup> véh x km]	nombre	taux [10 <sup>8</sup> véh x km]
Canada	- Ville-Marie	2 800	1988 - 1991	28,5	-	-	-	-	-	0,3
	- L.. Hippolyte Lafontaine	1 400	1987 - 1991	40,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
France	- Croix Rousse	1 800	1985 - 1991	29,4	6	2,0	0	0,0	6	1,8
	- Fourviere	1 800	1985 - 1991	34,9	7	1,8	1	1,9	8	1,8
	- Vieux Port	600	1989 - 1994	23,9	6	2,0	0	0,0	6	1,8
Allemagne	- Elbe	3 300 (avec rampes)	1990 - 1991	37,0	13	6,3	9	24,6	22	9,0
Pays-Bas	- Bénélux	1 300	1986 - 1988	25,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
	- Coen	1 200	1986 - 1988	30,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Norvège	- Oslo	1 800	1990 - 1993	18,3	-	-	-	-	-	2,0
Suède	- Fredhall	200	1987 - 1991	36,8	0	0,0	0	0,0	0	0,0
	- Söder	1 100	1987 - 1991	25,6	-	-	-	-	-	0,7
	- Klara	500	1987 - 1991	9,6	-	-	-	-	-	15,5
	- Karlberg	500	1987 - 1991	9,6	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Royaume-Uni	- Tyne	1 700	1987 - 1992	9,7	-	-	-	-	-	25,0
États-Unis	- Brooklyn	3 200	1989 - 1991	21,0	-	-	-	-	-	23,0
	- Battery	2 800	1989 - 1991	26,4	-	-	-	-	-	14,0
	- QueensMidtown	2 500	1987 - 1991	38,3	-	-	-	-	-	15,0
	- Lincoln									

Table 2.3.1 - Occurrence of tunnel fires in urban tunnels of several countries [18; 21; 29; 30; 31; 32; 33]

Country	Tunnel	Length [m]	Years inquired	Average annual traffic [10 <sup>6</sup> veh/year]	Cases of fires					
					Passenger cars		Lorries		All vehicles	
					Number	Rate [10 <sup>8</sup> veh x km]	Number	Rate [10 <sup>8</sup> veh x km]	Number	Rate [10 <sup>8</sup> veh x km]
Canada	- Ville-Marie	2800	1988 - 1991	28.5	-	-	-	-	-	0.3
	- L.. Hippolyte Lafontaine	1400	1987 - 1991	40.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
France	- Croix Rousse	1800	1985 - 1991	29.4	6	2.0	0	0.0	6	1.8
	- Fourviere	1800	1985 - 1991	34.9	7	1.8	1	1.9	8	1.8
	- Vieux Port	600	1989 - 1994	23.9	6	2.0	0	0.0	6	1.8
Germany	- Elbe	3300 (with ramps)	1990 - 1991	37.0	13	6.3	9	24.6	22	9.0
Netherlands	- Benelux	1300	1986 - 1988	25.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	- Coen	1200	1986 - 1988	30.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Norway	- Oslo	1800	1990 - 1993	18.3	-	-	-	-	-	2.0
Sweden	- Fredhall	200	1987 - 1991	36.8	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	- Söder	1100	1987 - 1991	25.6	-	-	-	-	-	0.7
	- Klara	500	1987 - 1991	9.6	-	-	-	-	-	15.5
	- Karlberg	500	1987 - 1991	9.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0
United Kingdom	- Tyne	1700	1987 - 1992	9.7	-	-	-	-	-	25.0
USA	- Brooklyn	3200	1989 - 1991	21.0	-	-	-	-	-	23.0
	- Battery	2800	1989 - 1991	26.4	-	-	-	-	-	14.0
	- Queens	2500	1987 - 1991	38.3	-	-	-	-	-	15.0
	- Midtown - Lincoln									

Table 2.3.2 - Occurrence des incendies dans les tunnels autoroutiers de rase campagne [18 ; 21 ; 29 ; 30 ; 31 ; 32 ; 33]

Type de circulation	Pays	Tunnel	Longueur [m]	Années observées	Trafic moyen annuel [10 <sup>6</sup> véh/an]	Cas d'incendies					
						Voitures particulières		Poids lourds		Tous véhicules	
						nombre	taux [10 <sup>8</sup> véh x km]	nombre	taux [10 <sup>8</sup> véh x km]	nombre	taux [10 <sup>8</sup> véh x km]
trafic uni-directionnel	France	Dullin	1 500	1984 - 1991	7,3	1	1,6	0	0,0	1	1,3
		Vuache	1 400	1990 - 1993	4,8	1	3,0	0	0,0	1	2,0
		Chatillon	700	1990 - 1992	6,0	1	10,4	0	0,0	1	8,0
		St.Germain de Joux	1 200	1990 - 1992	6,0	0	0,0	1	3,4	1	8,1
	Portugal	Aguas Santas	300	1991	7,6	0	0,0	0	0,0	0	0
	Suède	Karra	400	1987 - 1991	7,7	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Sorvik		200	1987 - 1991	7,7	0	0,0	0	0,0	0	0,0	
Askloster		300	1987 - 1991	4,0	-	-	-	-	-	19,0	
trafic bidirectionnel	Autriche	Perjen	2 900	1987 - 1991	3,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
		Amberg	3 000	1987 - 1991	5,4	0	0,0	0	0,0	0	0,0
		Pfänder	6 720	1985 - 1988	3,6	-	-	-	-	-	0,7
	France	L'Épine	3 100	1984 - 1991	5,8	1	0,6	1	40,0	2	1,1
		Chamoise	3 300	1988 - 1992	8,5	1	1,5	5	22,6	6	6,8
	Norvège	Hvaler	3 800	1989 - 1990	0,2	0	0,0	0	0,0	0	0,0
		Flekkeroy	2 300	1989 - 1990	0,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0
		Ellingsoy	3 500	1988 - 1990	1,1	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Valderoy		4 500	1988 - 1990	0,9	0	0,0	0	0,0	0	0,0	
Suède	Windo	500	1987 - 1991	1,6	0	0,0	0	0,0	0	0,0	
tunnels d'altitude avec trafic bidirectionnel	Autriche	Arlberg	14 000	1987 - 1991	1,7	-	-	-	-	-	2,5
		Katschberg	5 400	1987 - 1991	3,9	0	0,0	0	0,0	0	0,0
		Tauern	6 400	1987 - 1991	4,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
	France/Italie	Frejus	12 900	1980 - 1991	1,0	3	3,5	6	12,7	9	8,6
		Mont Blanc	11 600	1985 - 1992	1,9	4	1,5	17	12,9	21	5,4
	Japon	Kan-etsu	11 000	1985 - 1995	7,3	13	1,5	-	-	-	-
	Suisse	Gothard	16 900	1981 - 1987	3,7	-	-	-	-	-	3,0
		Seelisberg	9 300	1981 - 1987	4,2	-	-	-	-	-	2,0
San Bernardino		6 600	1968 - 1987	1,7	-	-	-	-	-	5,0	
Belchen		3 200	1978 - 1986	11,0	-	-	-	-	-	1,0	

Table 2.3.2 - Occurrence of tunnel fires in rural motorway tunnels [18; 21; 29; 30; 31; 32; 33]

Flow of traffic	Country	Tunnel	Length [m]	Years inquired	Average annual traffic [10 <sup>6</sup> veh/year]	Cases of fires					
						passenger cars		lorries		all vehicles	
						number	rate [10 <sup>8</sup> veh x km]	number	rate [10 <sup>8</sup> veh x km]	number	rate [10 <sup>8</sup> veh x km]
unidirectional traffic	France	Dullin	1500	1984 - 1991	7.3	1	1.6	0	0.0	1	1.3
		Vuache	1400	1990 - 1993	4.8	1	3.0	0	0.0	1	2.0
		Chatillon	700	1990 - 1992	6.0	1	10.4	0	0.0	1	8.0
		St. Germain de Joux	1200	1990 - 1992	6.0	0	0.0	1	3.4	1	8.1
	Portugal	Aguas Santas	300	1991	7.6	0	0.0	0	0.0	0	0
	Sweden	Karra	400	1987 - 1991	7.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0
		Sorvik	200	1987 - 1991	7.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Askloster		300	1987 - 1991	4.0	-	-	-	-	-	19.0	
bidirectional traffic	Austria	Perjen	2900	1987 - 1991	3.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
		Amberg	3000	1987 - 1991	5.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0
		Pfänder	6720	1985 - 1988	3.6	-	-	-	-	-	0.7
	France	L'Epine	3100	1984 - 1991	5.8	1	0.6	1	40.0	2	1.1
		Chamoise	3300	1988 - 1992	8.5	1	1.5	5	22.6	6	6.8
	Norway	Hvaler	3800	1989 - 1990	0.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0
		Flekkeroy	2300	1989 - 1990	0.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0
		Ellingsoy	3500	1988 - 1990	1.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0
		Valderoy	4500	1988 - 1990	0.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Sweden	Windo	500	1987 - 1991	1.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0
mountain tunnels with bidirectional traffic	Austria	Arlberg	14000	1987 - 1991	1.7	-	-	-	-	-	2.5
		Katschberg	5400	1987 - 1991	3.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0
		Tauern	6400	1987 - 1991	4.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	France/Italy	Frejus	12900	1980 - 1991	1.0	3	3.5	6	12.7	9	8.6
		Mont Blanc	11600	1985 - 1992	1.9	4	1.5	17	12.9	21	5.4
	Japan	Kan-etsu	11000	1985 - 1995	7.3	13	1.5	-	-	-	-
	Switzerland	Gothard	16900	1981 - 1987	3.7	-	-	-	-	-	3.0
		Seelisberg	9300	1981 - 1987	4.2	-	-	-	-	-	2.0
		San Bernardino	6600	1968 - 1987	1.7	-	-	-	-	-	5.0
Belchen		3200	1978 - 1986	11.0	-	-	-	-	-	1.0	

En comparant les taux des tableaux 2.3.1 et 2.3.2, il faut au moins conserver à l'esprit les conditions mentionnées ci-avant [18 ; 21 ; 31 ; 32] :

- en général, les incendies dans les tunnels routiers sont des événements rares, aussi la signification statistique des taux d'incendies est-elle limitée ; un seul incendie peut considérablement modifier ces taux ;
- en Suisse, le poids des véhicules lourds est limité à 28 tonnes, alors qu'aux Pays-Bas il est limité à 50 tonnes ;
- les taux indiqués pour la Suisse (tableau 2.3.2) représentent le nombre d'interventions des pompiers ;
- dans le Tunnel de l'Elbe en Allemagne ainsi que dans les tunnels français cités, chaque incendie détecté est comptabilisé, c'est-à-dire même ceux qui sont éteints par le conducteur du véhicule lui-même ;
- la proportion de poids lourds varie, pour les différents tunnels, d'environ 9 % jusqu'à 55 % (pour le Tunnel du Fréjus) ;
- dans de nombreux tunnels, le transport de marchandises dangereuses est soumis à des réglementations spéciales (par exemple, passage autorisé seulement pendant les heures creuses, guidage et contrôle durant la traversée du tunnel). Dans un nombre important de tunnels, il est interdit.

Cependant, à partir des taux indiqués dans les tableaux 2.3.1 et 2.3.2, les points suivants ressortent :

- le taux moyen d'incendie dans les tunnels routiers ne dépasse en aucun cas 25 incendies par  $10^8$  véhicules x km ;
- selon les statistiques disponibles à ce jour, les tunnels urbains semblent avoir un taux d'incendie plus élevé que les autres ;
- 40 % des tunnels observés n'ont jamais connu d'incendie ;
- dans plusieurs tunnels (par exemple, Chamoise, Elbe, Fréjus, Mont Blanc), le taux d'incendie des poids lourds est bien plus élevé que celui des véhicules particuliers ;
- une fréquence événementielle d'environ un incendie par mois à un incendie par an et par tunnel se rencontre seulement pour les tunnels qui sont soit très longs, soit très circulés, soit les deux ; une très large majorité de tunnels ont beaucoup moins d'incendies.

Comme indiqué par le taux d'incendie plus élevé, les incendies impliquant des poids lourds sont, dans certains tunnels, plus fréquents malgré leur trafic peu élevé. Ainsi, les données relatives au Tunnel de l'Elbe montrent qu'en moyenne, les poids lourds causent approximativement 30 % des incendies alors qu'ils comptent pour seulement 15 % environ du trafic total en semaine [20 ; 34].

When comparing the rates of tables 2.3.1 and 2.3.2 at least the conditions mentioned beneath should be kept in mind [18; 21; 31; 32]:

- in general fires in road tunnels are rare events, so the statistical significance of the rates of fires is limited; the rates can change considerably by only one fire event;
- in Switzerland the weight for heavy vehicles is limited to 28 tons, whereas in the Netherlands it is limited to 50 tons;
- the rates quoted for Switzerland (table 2.3.2) represent the number of times the fire brigade had to intervene;
- in the German Elb Tunnel as well as in all the French tunnels mentioned every detected fire is counted i.e. including those which are extinguished by the vehicle driver himself;
- the proportion of heavy goods vehicles varies from about 9% to about as high as 55% (Fréjus tunnel) for the different tunnels;
- in several tunnels hazardous transports are subjected to special regulations (e.g. restriction to times with low traffic, guidance and supervision during passing through the tunnel). In quite a number of tunnels they are prohibited.

Nonetheless from the rates for the tunnels quoted in tables 2.3.1 and 2.3.2 the following items show up:

- the average rate of fire in road tunnels does not exceed 25 fires per  $10^8$  vehicles x km in any of the cases;
- according to the statistics available up to now urban tunnels tend to have a higher fire rate than other tunnels;
- in about 40% of the observed tunnels no fire occurred;
- in several tunnels (e.g. Chamoise, Elb, Fréjus, Mont Blanc) the rate for lorry fires is considerably higher than for private cars;
- an event frequency span of about 1 fire per month to 1 fire per year per tunnel applies only to tunnels which are either very long, or with much traffic, or both. A very large majority of tunnels have far less fires.

As indicated by the higher fire rate, fire events involving lorries are in some tunnels more frequent than inferred from their traffic rate. So the Elb Tunnel data show that, on average, lorries cause approximately 30% of the fire cases although they account only for about 15% of total traffic on weekdays [20; 34].

Dans une étude française, menée sur 400 x 10<sup>6</sup> km parcourus en souterrain par des poids lourds, les incendies dans 26 tunnels ont été analysés et approximativement classés selon leur importance vis-à-vis de l'environnement souterrain (tableau 2.3.3). La puissance thermique des incendies considérés comme causant quelques dommages au tunnel est estimée être inférieure à 20 MW. Une puissance de plus de 20 MW est considérée seulement pour les très graves incendies [36]. Ainsi, les incendies graves sont des événements très rares, même vis-à-vis du nombre total de poids lourds dans les tunnels (tableau 2.3.3).

Tableau 2.3.3 - Estimation des taux d'incendie dans des tunnels français [35 ; 36]

Classification des incendies		Cas d'incendie pour 10 <sup>8</sup> véh x km
<b>Voitures</b>	Incendies de toutes importances	1 - 2
<b>Poids lourds sans marchandises dangereuses</b>	Incendies de toutes importances	8
	Incendies ayant occasionné quelques dommages au tunnel	1
	Incendies très graves	0,1 à 0,3 (estimation)
<b>Poids lourds transportant des marchandises dangereuses</b>	Incendies de toutes importances	2 (estimation)
	Incendies impliquant les marchandises dangereuses	0,3 (estimation)

Selon les premières données d'une étude française, le taux d'incendie d'un camion à l'air libre semble être quelque peu inférieur au taux d'incendie dans les tunnels [35 ; 36]. Mais ce résultat devra probablement être révisé lorsque plus d'informations seront rassemblées et que les schémas de classification utilisés par les différentes institutions concernées seront ajustés. De plus, il est probable que tous les incendies à l'air libre qui auraient pu avoir des répercussions importantes sur un tunnel n'ont pas été répertoriés.

Le risque qu'un véhicule prenne feu tend à augmenter en cas de surchauffe du moteur (voies du tunnel en pente raide, tunnels précédés d'une longue côte) et de surchauffe des freins (grandes descentes) [18 ; 21]. Sur une courte période après l'ouverture d'un nouveau tunnel, il peut également y avoir une tendance à plus d'incendies ainsi qu'il a été observé dans le Tunnel de l'Elbe [30]. Lorsque les conducteurs deviennent plus familiers avec l'environnement du tunnel, le taux d'incendie se stabilise à un niveau inférieur.

Comparativement au nombre total de pannes et d'accidents dans les tunnels, les incendies sont rares. Des données allemandes et suisses montrent que seule une panne sur 100 à 500 est accompagnée d'un incendie [30 ; 32]. Quant aux accidents, un incendie survient dans environ un sur 10 à 20 accidents.

Dans deux tunnels français à Lyon (Tunnel de Fourvière, Tunnel de La Croix Rousse), environ 40 % des incendies ont été maîtrisés à l'aide d'un extincteur (6 cas). Pour 60 % des incendies (8 cas), l'intervention des pompiers fut nécessaire [21].

In a French study representing  $400 \times 10^6$  km run by lorries underground, lorry fires in 26 tunnels were analysed and roughly classified according to their importance with regard to the tunnel environment (table 2.3.3). The heat release for fires classified as causing some damage to the tunnel is estimated to be below 20 MW. Only for the very serious fires a heat release of more than 20 MW is considered [36]. So, major fires are very rare events even in relation to the whole number of lorry fires in tunnels (table 2.3.3).

Table 2.3.3 - Estimation of fire rates in French tunnels [35; 36]

Classification of fire		Cases of fire for $10^8$ veh x km
<b>Passenger cars</b>	fires of any importance	1 - 2
<b>Lorries without dangerous goods</b>	fires of any importance	8
	fires with some damage to the tunnel	1
	very serious fires	0.1 to 0.3 (estimation)
<b>Lorries transporting dangerous goods</b>	fires of any importance	2 (estimation)
	fires with involvement of the dangerous goods	0.3 (estimation)

According to first data given in a French study the lorry fire rate on open roads seems to be somewhat lower than in tunnels [35; 36]. But, probably this result has to be revised when more information is gathered and the classification schemes used by the different institutions involved are adjusted. Furthermore, probably not all fires in the open that might have caused important consequences in a tunnel have been recorded.

The risk of a vehicle fire tends to increase in situations of intensified motor heating (steep uphill lanes of tunnels, tunnels after a long uphill slope) and intensified brake heating (long downward slopes) [18; 21]. Also for a short period since the opening of a new tunnel there can be a tendency to more fire events as it was observed in the Elb Tunnel [30]. As the drivers become more acquainted with the tunnel environment the fire rate will stabilise on a lower level.

In relation to the whole number of breakdowns and accidents in tunnels, fires are rare events. German and Swiss data show that only about 1 of 100 to 500 breakdowns is accompanied by a fire [30; 32]. In comparison with accidents in about 1 of 10 to 20 accidents fire is involved.

According to two French tunnels in Lyon (Tunnel Fourviere, Tunnel La Croix Rousse) about 40% of the fires were blown out by a fire extinguisher (6 cases). In about 60% of the events (8 cases) the help of a fire brigade was needed [21].

De par le monde, il y a eu très peu d'incendies très sérieux avec de graves conséquences pour les conducteurs, les passagers, les véhicules et le tunnel. Ces événements rares, mais graves, sont résumés au tableau 2.3.4 qui couvre une vaste période, près d'un demi-siècle, de 1949 à 1995. Ces 16 événements majeurs dans plus de 80 pays membres de l'AIPCR eurent les conséquences suivantes :

- risques pour les personnes (par exemple, usagers du tunnel, pompiers),
- chaleur, fumée, gaz, manque d'oxygène et perte de visibilité conduisant à des intoxications, suffocations, brûlures et même décès (fort heureusement dans seulement 7 des 16 incendies, et pas plus de 7 décès par incendie jusqu'à présent) ; dans la plupart des cas, lors de blessures ou décès donnant lieu à des rapports, ces derniers ne mentionnent pas clairement si cela est dû à l'incendie ou à un accident avant qu'il ne dégénère en incendie (sauf pour le tunnel de Pfänder en 1995 et le tunnel d'Isola delle Femmine en 1996 [40 ; 41]),
- destruction d'équipements du tunnel (par exemple, éclairage, ventilation, télécommunications),
- dommages à la structure du tunnel : les principaux sont l'écaillage du béton, la surchauffe des armatures du béton, l'effondrement du faux-plafond et des gaines de ventilation,
- sérieux dégâts ou destruction des véhicules incendiés et des biens transportés,
- fermeture du tunnel en raison de l'incendie lui-même, des dommages structurels et des indispensables travaux de réparation.

Les impacts de ce dernier aspect ne doivent en aucun cas être sous-estimés. Dans certain cas, la remise en état a pris des semaines, voire des mois [20 ; 34]. Pendant ce temps, les encombrements de circulation sur les routes adjacentes au tunnel fermé sont une conséquence inévitable, tout spécialement dans les agglomérations.

World-wide only very few fire events developed into major fires with serious consequences for the drivers and passengers, vehicles and tunnel constructions involved. These rare, but severe events are summarised in table 2.3.4 which covers a time span from the year 1949 to the year 1995 - nearly half a century. These 16 major events in the more than 80 PIARC member countries were accompanied by:

- risks for people (e.g. tunnel user, fire brigade);
- heat, smoke, gases, lack of oxygen and loss of visibility led to intoxication, suffocation, burns and even death (fortunately in only 7 of the 16 events, and in none of them more than 7 fatalities up to now); when there are reports about injured or dead people, in most cases it is not quite clear whether this is due to the fire event or to an accident before it developed into a fire event (except for the Pfänder Tunnel in 1995 and the Isola delle Femmine Tunnel in 1996 [40; 41]);
- destroying of tunnel equipment (e.g. lighting, ventilation, telecommunication);
- damage to the tunnel construction: main effects are spalling of concrete, overheating of concrete reinforcement, collapse of false ceilings and ventilation ducts;
- severe damage or loss of the burning vehicles and their goods;
- close down of the tunnel due to the fire event itself, the structural damage and the necessary repair work thereafter.

The effects of this latter aspect should on no account be underestimated. In some cases, redevelopment can take weeks or months [20; 34]. During this time traffic congestion on the roads in the vicinity of the closed tunnel is an almost inevitable result especially in built-up areas.

Tableau 2.3.4 - Incendies graves dans des tunnels routiers [20 ; 31 ; 34 ; 37 ; 38 ; 39 ; 40 ; 41]

Année	Tunnel	Lieu et pays	Véhicules à l'origine de l'incendie	Cause probable	Durée de l'incendie	Conséquences sur		
						Personnes <sup>(1)</sup>	Véhicules	Tunnel
1949	Holland L = 2 550 m	New York États-Unis	1 camion chargé de 11 t de bisulfure de carbone	chute de la charge du camion	4 h	66 blessés par inhalation de fumée	10 camions 13 voitures	Importants dégâts sur 200 m
1968	Moorfleet L = 243 m	Hamburg Allemagne	1 camion remorque (14 t de sacs en polyéthène)	blocage des freins	1 h 30	néant	1 remorque	Importants dégâts sur 34 m
1975	Guadarrama L = 3.330 m	Guadarrama Espagne	1 camion citerne chargé de résine de pin	inconnue	2 h 45	néant	1 camion	Importants dégâts sur 210 m
1976	B6 L = 430 m	Paris France	1 camion chargé de 16 t de paquets de polyester	inconnue	1 h	12 blessés légers par inhalation de fumée	1 camion	Dégâts sur 150 m
1978	Velsen L = 770 m	Velsen Pays-Bas	2 camions + 4 voitures	collision frontale	1 h 20	5 morts 5 blessés	2 camions 4 voitures	Importants dégâts sur 30 m
1979	Nihonzaka L = 2 045 m	Shizuoka Japon	4 camions + 2 voitures	collision frontale	4 jours	7 morts 2 blessés	127 camions 46 voitures	Importants dégâts sur 1 100 m
1980	Kajiwara L = 740 m	Japon	1 camion (4 t) avec 3 600 l de peinture dans 200 bidons + 1 camion (10 t)	collision contre la paroi et renversement		1 mort	1 camion (4 t) 1 camion (10 t)	Dégâts sur 280 m
1982	Caldecott L = 1 028 m	Oakland États-Unis	1 camion + 1 car + 1 voiture 33 000 l d'essence	collision frontale	2 h 40	7 morts 2 blessés	3 camions + 4 voitures + 1 car	Importants dégâts sur 580 m
1983	Fréjus L = 12 868 m	Modane France-Italie	1 camion chargé de matières plastiques	rupture de la boîte de vitesses	1 h 50 mn	néant	1 camion	Importants dégâts sur 200 m
1984	Felbertauern L = 5 130 m	Autriche	1 autobus	blocage des freins	1 h 30 mn	néant	1 autobus	Dégâts au plafond et aux équipements sur 100 m
1984	Gotthard L = 16 321 m	Goeschenen Suisse	1 camion chargé de rouleaux de plastique	incendie au moteur	24 mn	néant	1 camion	Importants dégâts sur 30 m
1987	Gumefens L = 340 m	Bern Suisse	1 camion	collision en chaîne sur route glissante	2 h	2 morts	2 camions 1 camionnette	Dégâts légers
1993	Serra Ripoli L = 442 m	Bologne Italie	1 voiture + 1 camion chargé de rouleaux de papier	perte de contrôle d'un véhicule et collision	2 h 30	4 morts + blessés	4 camions 11 voitures	Importants dégâts au revêtement
1994	Gotthard L = 16 321 m	Goeschenen Suisse	1 camion + remorque chargée de vélos emballés de carton et de plastique	frottement des roues / mauvais chargement de la remorque	2 h	néant	1 camion + remorque	Importants dégâts au plafond, à la chaussée et aux équipements sur 50 m, tunnel fermé pendant deux jours et demi
1995	Pfänder L = 6 719 m	Autriche	1 camion, 1 camionnette, 1 voiture	collision	1 h	3 morts (en raison du choc)	1 camion 1 camionnette 1 voiture	Importants dégâts au plafond et aux équipements, tunnel fermé pendant deux jours et demi
1996	Isola delle Femmine L = 150 m	Italie (Sicile)	1 camion citerne rempli de gaz liquide + 1 petit autobus	chaussée humide, collision d'un autobus avec un camion citerne (à l'arrêt en raison d'une précédente collision), explosion	inconnu	5 morts (par l'incendie) 20 blessés	1 camion citerne 1 autobus 18 voitures	Dégâts au revêtement du tunnel et aux appareils d'éclairage

Table 2.3.4 - Serious fires in road tunnels [20; 31; 34; 37; 38; 39; 40; 41]

Year	Tunnel	Place and country	Vehicles at origin of fire	Probable cause	Duration of fire	Consequences on		
						People <sup>(1)</sup>	Vehicles	Tunnel
1949	Holland L = 2.550 m	New York USA	1 lorry loaded with 11 t of carbon bisulfur	load falling of lorry	4 h	66 injured smoke inhalation	10 lorries 13 cars	serious damage for 200 m
1968	Moorfleet L = 243 m	Hamburg Germany	1 lorry trailer (14 t of polyethene bags)	brakes jamming	1 h 30 mn	none	1 trailer	serious damage for 34 m
1975	Guadarrama L = 3.330 m	Guadarrama Spain	1 lorry loaded with tanks of pine resin	unknown	2 h 45 mn	none	1 lorry	serious damage for 210 m
1976	B6 L = 430 m	Paris France	1 lorry loaded with 16 t of polyester in bundles	unknown	1 h	12 slight injured smoke inhalation	1 lorry	damage for 150 m
1978	Velsen L = 770 m	Velsen Netherlands	2 lorries + 4 cars	front-back collision	1 h 20 mn	5 dead 5 injured	2 lorries 4 cars	serious damage for 30 m
1979	Nihonzaka L = 2.045 m	Shizuoka Japan	4 lorries + 2 cars	front-back collision	4 days	7 dead 2 injured	127 lorries 46 cars	serious damage for 1.100 m
1980	Kajiwara L = 740 m	Japan	1 truck (4 t) with 3.600 l paint in 200 cans + 1 truck (10 t)	collision with side wall and overturning		1 dead	1 truck (4 t) 1 truck (10 t)	damage for 280 m
1982	Caldecott L = 1.028 m	Oakland USA	1 lorry + 1 coach + 1 car 33.000 l of petrol	front-back collision	2 h 40 mn	7 dead 2 injured	3lorries+4cars + 1 coach	serious damage for 580 m
1983	Fréjus L = 12.868 m	Modane France-Italy	1 lorry loaded with plastic materials	gear box breaking	1 h 50 mn	none	1 lorry	serious damage for 200 m
1984	Felbertauern L = 5.130 m	Austria	1 bus	blocking brakes	1 h 30 mn	none	1 bus	damage to ceiling and equipment for 100 m
1984	Gotthard L = 16.321 m	Goeschenen Switzerland	1 lorry loaded with rolls of plastic	fire in engine	24 mn	none	1 lorry	serious damage for 30 m
1987	Gumefens L = 340 m	Bern Switzerland	1 lorry	mass collision on slippery road	2 h	2 dead	2 lorries 1 van	slight damage
1993	Serra Ripoli L = 442 m	Bologna Italy	1 car + 1 lorry loaded with rolls of paper	vehicle out of control and collision	2 h 30 mn	4 dead + injured	4 lorries 11 cars	serious damage to lining
1994	Gotthard L = 16.321 m	Goeschenen Switzerland	1 lorry + trailer loaded with bikes wrapped in carton and plastic	friction wheel/ loading bridge	2 h	none	1 lorry + trailer	serious damage to ceiling, pavement and equipment for 50 m, tunnel closed for 2.5 days
1995	Pfänder L = 6.719 m	Austria	1 lorry + 1 van + 1 car	collision	1 h	3 dead (by crash)	1 lorry 1 van 1 car	serious damage to ceiling and equipment, tunnel closed for 2.5 days
1996	Isola delle Femmine L = 150 m	Italy (Sicilia)	1 tanker with liquid gas + 1 little bus	wet road collision of a bus with a tanker (stopped because of a previous collision), explosion	unknown	5 dead (by fire) 20 injured	1 tanker 1 bus 18 cars	damages to the tunnel lining and lighting equipment

## II.4 Choix des incendies de dimensionnement

Les matériaux qui brûlent au cours d'un incendie proviennent essentiellement des véhicules impliqués. Ce sont des éléments des véhicules, tels que sièges, pneus, matières plastiques utilisées pour les finitions, voire pour la carrosserie elle-même, le carburant contenu dans les réservoirs (dont le volume se monte à des centaines de litres pour les camions), ainsi que le chargement transporté, principalement en ce qui concerne les véhicules de transport de marchandises. La nature des marchandises transportées est extrêmement variable et peut provoquer de multiples variétés d'incendies. Quelques exemples de charge calorifique sont donnés au tableau 2.4.1.

Tableau 2.4.1 - Exemples de charge calorifique [20 ; 42]

Type de véhicule	Charge calorifique [MJ]	Remarques
Voitures particulières	3 000 - 3 900	Utilisé pour des essais d'incendie en Finlande
Voiture particulière	6 000	Utilisé pour les essais d'incendie EUREKA
Voiture en matière plastique	7 000	
Autobus	41 000	
Charge combustible d'un transport international routier	65 000	
Poids lourds	88 000	
Camion citerne avec 50 m <sup>3</sup> d'essence	1 500 000	Hypothèse néerlandaise pour un grand incendie de dimensionnement

Des caractéristiques différentes de l'incendie sont nécessaires, selon que l'on veut dimensionner la structure du tunnel ou les équipements de ventilation (désenfumage) :

- le dimensionnement de la résistance au feu des structures est fondé sur la température de l'air chaud (°C) en fonction du temps ;
- le dimensionnement de la ventilation est fondé sur la puissance thermique (en MW) ou sur le débit de fumée (mesuré en m<sup>3</sup>/s à la température des fumées chaudes) en fonction du temps ; l'évolution en fonction du temps est très importante pour évaluer les conditions au début de l'incendie, en prenant en compte la phase d'évacuation (délai d'arrivée et d'organisation des pompiers).

Pour le dimensionnement, il est nécessaire de choisir des caractéristiques types d'incendie correspondant au trafic empruntant un tunnel donné. Des conditions telles que l'autorisation des transports de marchandises dangereuses doivent être prises en compte.

Dans ce qui suit, les données sont communiquées pour les véhicules particuliers, les autobus et les camions ; ces données sont fondées sur les essais d'incendie EUREKA sur les véhicules routiers et le rapport de Bruxelles (Congrès AIPCR) [19 ; 20 ; 43 ; 44]. Pour les camions citernes, ce sont les données de KIVI [42] et du Tunnel d'Oresund [43] qui sont utilisées.

## II.4 Choice of design fires

The materials which burn in a fire mostly come from the vehicles involved. They include elements of the vehicles such as the seats, tyres, plastic materials in the finishing, or even in the body work itself, the fuel from the vehicle tanks, which amounts to hundreds of litres for trucks, and the loading, principally for goods vehicles. This latter can be extremely varied and lead to many different sorts of fires. Some principle examples of combustion energy outputs are given in table 2.4.1.

Table 2.4.1 - Examples of combustion energy outputs [20; 42]

Type of vehicle	Approx. energy content [MJ]	Remarks
Private cars	3 000 - 3 900	Used for fire tests in Finland
Private car	6 000	Used for EUREKA fire tests
Plastic car	7 000	
Public bus	41 000	
TIR fire load	65 000	
Heavy goods vehicle	88 000	
Tanker with 50 m <sup>3</sup> petrol	1 500 000	Dutch assumption for a "large" design fire

Different fire characteristics are needed depending on whether the purpose is to design the tunnel structure or the ventilation facilities (smoke control):

- The design of structures for fire resistance is based on the temperature of the hot air (°C) versus time.
- The design of ventilation is based on the heat release rate (thermal power in MW) or the smoke release rate (flow at the temperature of the hot smoke in m<sup>3</sup>/s) versus time. The dependence upon time is very important to evaluate the conditions at the beginning of the fire, taking into account the evacuation phase (time for fire brigade to arrive and get organised).

For design purposes, it is necessary to choose typical fire characteristics corresponding to the traffic which uses a particular tunnel. Conditions like the allowance of hazardous transports have to be taken into account.

In the following, data is given for passenger cars, buses and lorries which are based on the EUREKA fire-tests on road vehicles and the Brussels report of PIARC [19; 20; 43; 44]. For petrol tankers data from KIVI [42] and the Oresund Tunnel [43] are used.

Il faut souligner que tous les résultats EUREKA dépendent bien évidemment des conditions d'essais. Celles-ci incluent de basses vitesses de l'air durant la plupart des essais et une section transversale sensiblement plus petite que dans les tunnels routiers habituels, ce qui

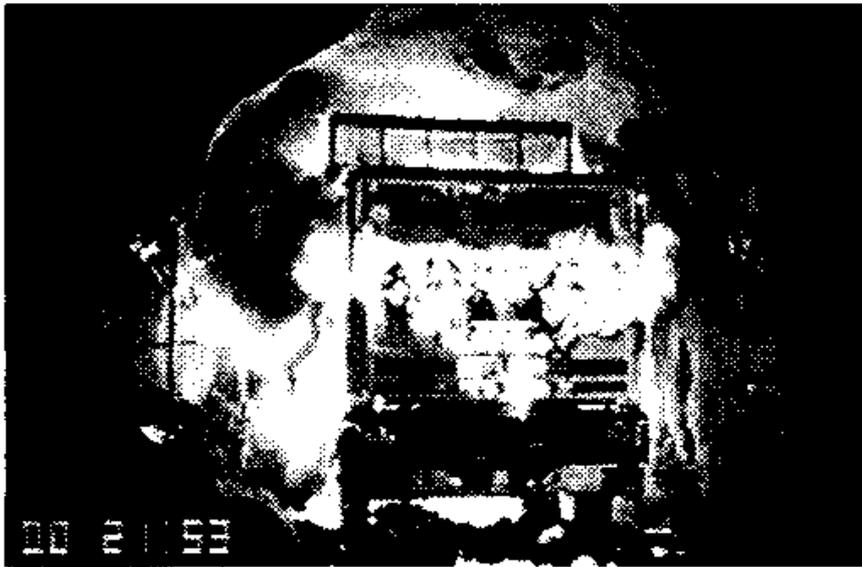


Photo 2.2 - Incendie de poids lourd

Photo 2.2 - Heavy Goods Vehicles (HGV) fire

surévalue le rayonnement thermique renvoyé par les parois. L'essai avec un poids lourd, par ailleurs, a été fait spécialement avec une vitesse longitudinale de l'air de 6 m/s en avant de l'incendie pendant les 15 premières minutes, ce qui donnait en moyenne environ 13 m/s autour du véhicule : une telle vitesse est significa-

lement rencontré dans les tunnels routiers et elle produit également une combustion plus intense. En conséquence, les essais EUREKA donnent des indications précieuses sur les conditions durant un incendie, mais ils peuvent difficilement fournir par eux-mêmes de nouvelles valeurs réalistes de dimensionnement. Aucune donnée nouvelle n'est disponible en ce qui concerne les incendies de marchandises dangereuses.

tivement supérieure à ce qui est généra-

#### II.4.1 Températures maximales aux parois du tunnel

Les essais EUREKA ont confirmé les températures maximales présentées dans le rapport de Bruxelles [19 ; 20]. Les essais eux-mêmes (figures 2.4.1 et 2.4.2) ont donné des résultats légèrement supérieurs pour les véhicules particuliers (jusqu'à 500 °C selon le type) et le car (800 °C) en raison de la petite zone de section transversale et la faible vitesse de l'air (0,3 m/s et 0,5 m/s). Les essais d'incendie ont également montré que les incendies dus aux poids lourds peuvent produire des températures allant jusqu'à 1 000 °C au niveau du plafond et des pénétrations (figures 2.4.1 et 2.4.2). Le rapport de Bruxelles indique cette même température pour un camion citerne contenant de l'essence. Pour les grands camions citernes (environ 50 m<sup>3</sup> d'essence), les règles néerlandaises spécifient qu'il est possible d'atteindre des températures de 1 400 °C ([42], mais que cela dépend fortement du débit de la fuite d'essence et de la capacité du système de drainage du tunnel ([43], voir également le paragraphe II.4.3 ci-après sur la puissance thermique). Ainsi, cette haute température ne doit être considérée qu'en cas de circonstances exceptionnelles, par exemple dans un tunnel immergé où la rupture d'une quelconque partie du toit provoquerait une catastrophe. Cette très haute température peut également être utilisée si la fermeture d'un tunnel risque d'avoir des conséquences fâcheuses sur toute la région.

It must be emphasised that all the EUREKA results are of course dependent upon the test conditions. These include low air velocities during most of the tests and a cross-section significantly smaller than usual for road tunnels, which overestimates the heat radiation coming back from the walls. The test with a Heavy Goods Vehicle (HGV) on the other hand was specifically conducted with a longitudinal air velocity of about 6 m/s ahead of the fire during the first 15 minutes, which gave about 13 m/s on average around the vehicle: such a velocity is significantly higher than what is normally encountered in road tunnels and also produces a more intense combustion. As a consequence the EUREKA tests give valuable hints about the conditions during a fire event, but they can hardly provide new realistic design values on their own. No new experimental data is available concerning dangerous goods fires.

### II.4.1 Maximum temperatures at the tunnel wall

The EUREKA tests confirmed the maximum temperatures as quoted in the Brussels report [19; 20]. The tests themselves (figures 2.4.1 and 2.4.2) gave slightly higher results for the passenger cars (up to 500 °C, depending on type) and the coach (800 °C) because of the small cross section area and the low air velocity used (0.3 m/s and 0.5 m/s). The fire tests also showed that fires due to HGV can produce temperatures up to 1000 °C at the tunnel ceiling and side walls (figures 2.4.1 and 2.4.2). This is the same temperature as quoted by PIARC in the Brussels report for a petrol tanker. For large petrol tankers (about 50 m<sup>3</sup> of petrol) Dutch regulations imply that temperatures up to 1400 °C may be reached [42], but there is a strong dependence on the rate of petrol leakage and the capacity of the drainage system of the tunnel ([43], see also chapter II.4.3 below dealing with heat release). So, this high temperature should only be considered if special circumstances are given, for instance immersed tunnels where the collapse of any part of the roof will result in a catastrophe. Also if the closing of a tunnel could harm the entire region, this extremely high temperature could be used.

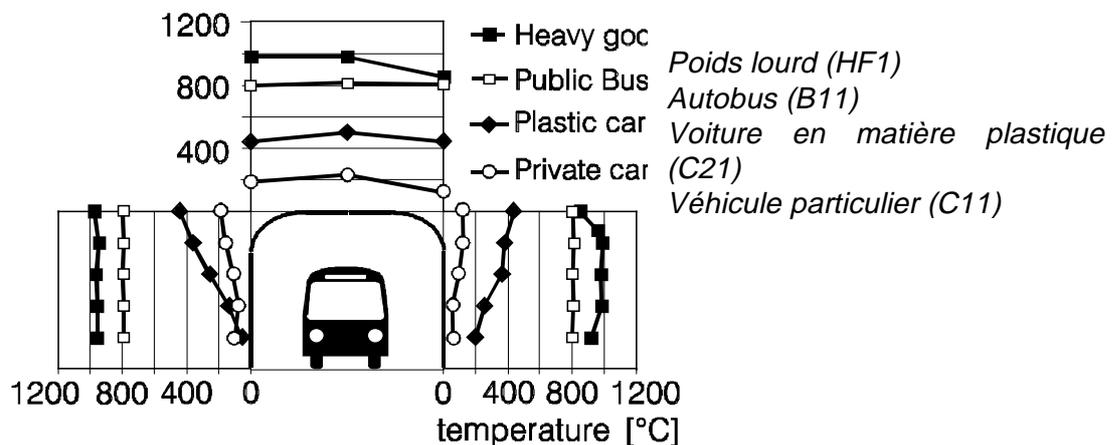


Figure 2.4.1 - Maximum temperatures in the cross-section of the tunnel during tests with road vehicles [20]

Figure 2.4.1 - Températures maximales dans la section transversale du tunnel lors d'essais avec des véhicules routiers [20]

Comme le montre la figure 2.4.2 dans les essais EUREKA, des températures potentiellement dangereuses pour les armatures du béton ont été enregistrées jusqu'à environ 100 m en aval de l'incendie et, en raison de la remontée de fumées, jusqu'à environ 30 m en amont. L'étendue de cette zone peut être sensiblement différente selon les tunnels, en raison notamment de la ventilation, de la déclivité du tunnel, de la rugosité de la surface et des revêtements résistant au feu. Une nouvelle évaluation des résultats d'EUREKA est nécessaire pour parvenir à des spécifications plus globales des zones menacées.

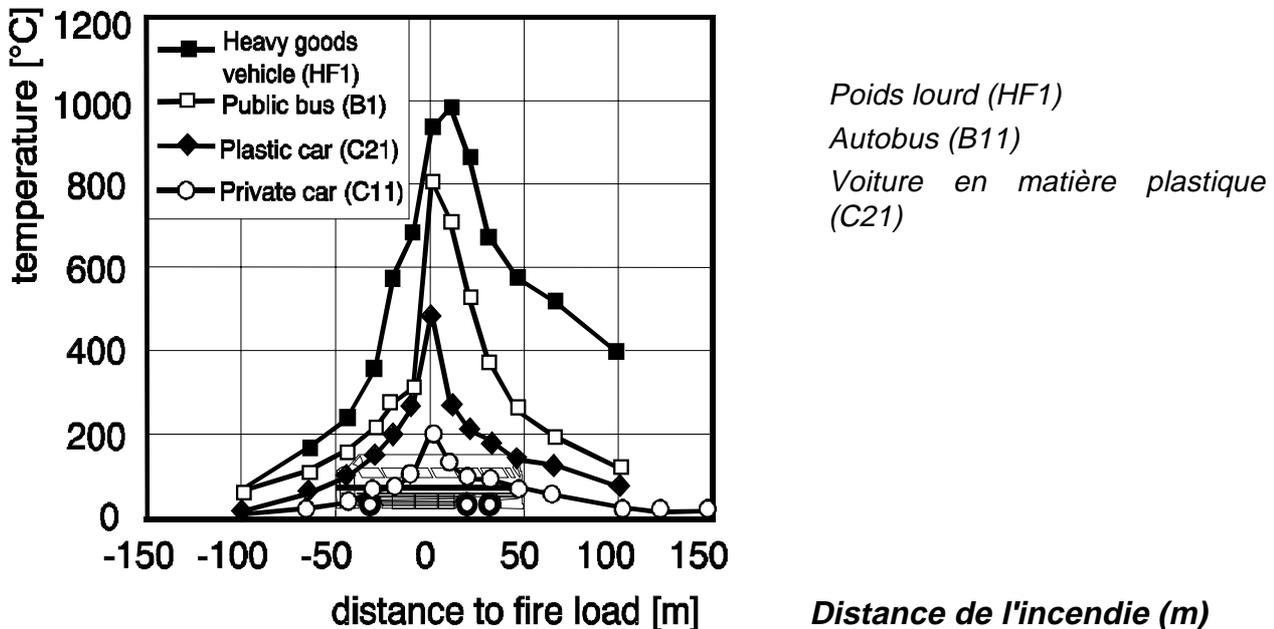


Figure 2.4.2 - Températures maximales au niveau du plafond du tunnel lors d'essais avec des véhicules routiers [20]

Figure 2.4.2 - Maximum temperatures in the ceiling area of the tunnel during tests with road vehicles [20]

Dans l'ensemble, les températures maximales suivantes au niveau des parois ou du plafond doivent être considérées en ce qui concerne la structure du tunnel et les réglementations du trafic poids lourds pour des tunnels spéciaux :

- voiture particulière 400 °C
- autobus/petit camion 700 °C
- poids lourd (HGV) avec matières combustibles (sauf essence ou autres marchandises dangereuses) 1 000 °C
- camion citerne d'essence (cas général) 1 200 °C
- camion citerne d'essence (cas extrêmes : par exemple, aucun bénéfice tiré du drainage du tunnel et d'un débit de fuite limité ; grande citerne ; éviter l'inondation d'un tunnel immergé) 1 400 °C

\* : plus élevée si les flammes touchent la paroi.

## II.4.2 Température en fonction du temps

De nombreux incendies réels, de même que les incendies EUREKA (figure 2.4.3), se sont développés très rapidement durant les 5 à 10 premières minutes (parfois 15). L'augmentation de température est plutôt rapide et l'émission de chaleur et de fumée très importante. Entre 7 et 10 minutes après le début de l'incendie, il faut tenir compte de l'embrasement (voire dans un délai plus court pour une voiture particulière).

As can be seen by figure 2.4.2 in the EUREKA tests, temperatures which can be dangerous to the steel reinforcement of concrete were found till about 100 m downstream of the fire and because of back-layering till about 30 m upstream of the fire. The extension of this region in various road tunnels can be quite different from these values due to e.g. the ventilation, tunnel inclination, surface roughness and fire-resistant coatings. For a more general specification of endangered regions a further evaluation of the EUREKA results is necessary.

On the whole the following maximum temperatures at the tunnels wall or ceiling should be considered with regard to the tunnel structure and the cargo-traffic-regulations for specific tunnels:

- passenger car 400 °C \*
- bus/small lorry 700 °C \*
- heavy lorry (HGV) with burning goods (not petrol or other dangerous goods) 1 000 °C
- petrol tanker (general case) 1 200 °C
- petrol tanker (extreme cases: e.g. no benefits due to tunnel drainage and limited leakage rate; large tanker; avoidance of the flooding of an immersed tunnel) 1 400 °C

\*: Higher if flames touch the walls.

## II.4.2 Temperature versus time

Many known real tunnel fires and also the EUREKA fires (figure 2.4.3) showed a very fast development during the first 5 to 10 (sometimes 15) minutes. The gradient of temperature is rather steep and the emission of heat and smoke very important. Between 7 and 10 minutes after the fire incident starts a flash-over has to be taken into account (even sooner in the case of a passenger car).

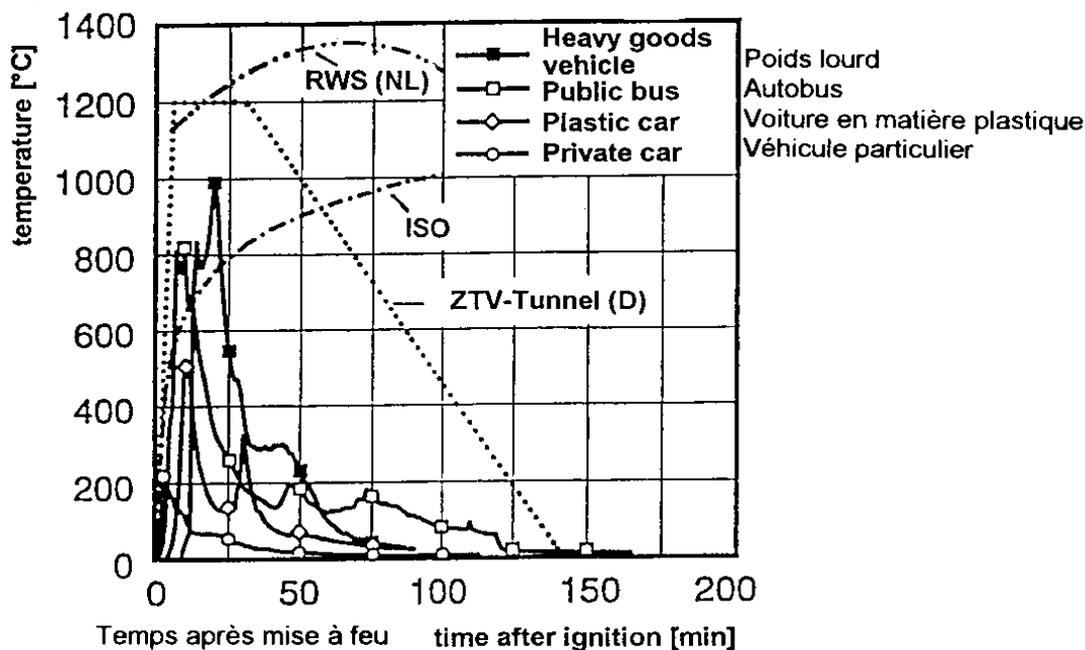


Figure 2.4.3 - Time dependency of temperatures in Eureka tunnel fires and standard curves used in regulations upon fire protection [43; 44; 45]

Figure 2.4.3 - Températures en fonction du temps dans les incendies de tunnel Eureka et courbes standard utilisées dans les réglementations pour la protection contre les incendies [43 ; 44 ; 45]

Ce comportement n'est pas couvert par la courbe standard de température de la norme ISO 834 (voir figure 2.4.3). C'est pourquoi plusieurs courbes de températures ont été proposées, qui se rapprochent plus précisément des phases importantes d'un incendie dans un tunnel. Ces spécifications sont incluses par exemple dans :

- les réglementations néerlandaises du Rijkswaterstaat ([43 ; 44] : courbe RWS, voir figure 2.4.3),
- les normes allemandes "ZTV-Tunnel" ([45], voir figure 2.4.3).

Un fort gradient de température en début d'incendie est inclus dans la courbe hydrocarbure (HC) qui est décrite, en plus d'ISO 834, dans le projet Eurocode 1 [46]. La température maximale de 1 100 °C est quelque peu inférieure à celle des courbes RWS ou ZTV. Jusqu'à présent, aucune de ces courbes n'a rencontré de consensus au niveau mondial. Les discussions portent sur :

- les courbes en fonction du temps à proximité des incendies,
- la fixation d'une durée appropriée pour les courbes de référence (ISO, HC).

Eu égard à la probabilité des différents incendies, il devrait y avoir plus de souplesse dans le choix des températures maximales pour, par exemple, les essais de matériaux sur les revêtements résistant au feu ou les équipements de ventilation. Les hypothèses sur la durée d'un incendie devraient également être distinguées selon qu'il s'agit de l'incendie d'un camion ou d'une voiture particulière.

La durée de la phase chaude d'un incendie couvre normalement un intervalle de temps d'environ 30 à 60 mn après l'étape de mise à feu (figure 2.4.3), sauf en cas d'incendie d'une nappe d'essence importante provenant d'un camion citerne. Dans ce dernier cas, les réglementations néerlandaises [42] indiquent une phase chaude d'environ deux heures. Si les pompiers peuvent effectivement arriver rapidement (en quelques minutes) sur les lieux, la durée de la phase chaude sera plus courte.

Après la phase chaude, il faudra du temps avant que l'incendie ne s'éteigne s'il n'y a pas d'action pour l'éteindre. Les normes allemandes ZTV admettent environ 110 mn de température linéairement décroissante. Les essais EUREKA ont confirmé la durée des incendies, mais ont montré un plus rapide déclin des températures juste après la phase chaude (figure 2.4.3). D'un autre côté, l'incendie de Nihonzaka a duré quatre jours (tableau 2.3.4).

### II.4.3 Puissance thermique

Le choix des puissances thermiques pour des scénarios d'incendie principalement destinés au dimensionnement de la ventilation aura une grande influence sur la construction (y compris le génie civil) et sur les coûts d'exploitation d'un tunnel routier. Ainsi, dans certains pays, des groupes de travail comprenant des représentants des maîtres d'ouvrage, des pompiers, des législateurs et des consultants, travaillent sur des recommandations pour le choix des puissances thermiques. L'AIPCR a également recommandé des puissances thermiques dans son rapport de Bruxelles en 1987 [19].

This behaviour is not covered by the standard temperature curve according to ISO Standard 834 (see figure 2.4.3). Therefore several temperature curves were put forward which model important phases of a tunnel fire more closely. Specifications are included e.g. in the

- Dutch regulations of Rijkswaterstaat ([43; 44]: RWS-curve, see figure 2.4.3),
- German "ZTV-Tunnel" ([45], see figure 2.4.3).

A similar steep temperature gradient at beginning of the fire is included in the hydrocarbon (HC) curve which is described besides the ISO 834 in the draft of the Eurocode 1 [46]. The maximum temperature of 1100 °C is somewhat lower than given by RWS or ZTV. Up to now none of the curves has found general acceptance world-wide. Discussions focus on :

- time shape of curves close to the progress of tunnel fires, and
- setting of appropriate duration of standard curves (ISO, HC).

With regard to the probability of the different fire events there should be more flexibility in choosing maximum temperatures for the purpose of e.g. material tests on fire-resistant coatings or ventilation equipment. Also the assumptions about the duration of a fire should be split according to fires of lorries and passenger cars.

The duration of the hot phase of a fire covers normally a time interval of about 30 minutes to 60 minutes after ignition stage (figure 2.4.3) if no big pool fire due to a petrol tanker is involved. For a big petrol tanker the Dutch regulations [42] indicate a hot phase of about two hours. If fire brigades which can deal with the fire effectively arrive soon (within some minutes) on the scene, the duration of the hot phase will be shorter.

After the hot phase it will take time for the fire to die away if it is not extinguished. The German ZTV-Tunnel assumes about 110 minutes of linear temperature decaying. The EUREKA tests confirmed the duration of fires but show a steeper decline of temperatures just after the hot phase (figure 2.4.3). On the other hand the Nihonzaka fire lasted four days (table 2.3.4).

### II.4.3 Heat release rate

The choice of heat release rates for fire scenarios mainly related to the purpose of ventilation design will have a great influence on construction (including civil engineering) and operating costs of a road tunnel. So in some countries, working groups with representatives from tunnel owners, fire brigades, regulators and consultants are dealing with recommendations for the choice of heat release rates. PIARC also recommended heat release rates in the Brussels report in 1987 [19].

Depuis, des progrès ont été réalisés. En regroupant les essais d'incendie EUREKA en Norvège et en Finlande, les données AIPCR de Bruxelles et les récentes propositions du CETU (France), on peut faire apparaître les données approximatives suivantes de puissance thermique pour une durée significative d'un incendie dans un tunnel [19 ; 20 ; 36] (exemple : figure 2.4.4, camion citerne d'essence : voir tableau 2.4.2) :

- 1 petite voiture particulière : 2,5 MW
- 1 grande voiture particulière : 5 MW
- 2-3 voitures particulières : 8 MW
- 1 camionnette : 15 MW
- 1 autobus : 20 MW
- 1 camion avec matières combustibles (cas général) : 20-30 MW

Les poids lourds plus importants transportant des matières combustibles, et plus spécialement des marchandises dangereuses, peuvent produire de fortes puissances thermiques. Les essais d'incendie EUREKA sur poids lourd ont révélé une puissance maximale d'environ 100 à 120 MW, mais seulement sur une très courte période.

Les puissances maximales réelles peuvent s'écarter de ces valeurs car elles dépendent du type de véhicule, du type de cargaison, de la ventilation, des vitesses de combustion, etc. Pour les camions citernes d'essence, les fuites provoquées par un accident et la capacité du système de drainage du tunnel ont également une grande influence.

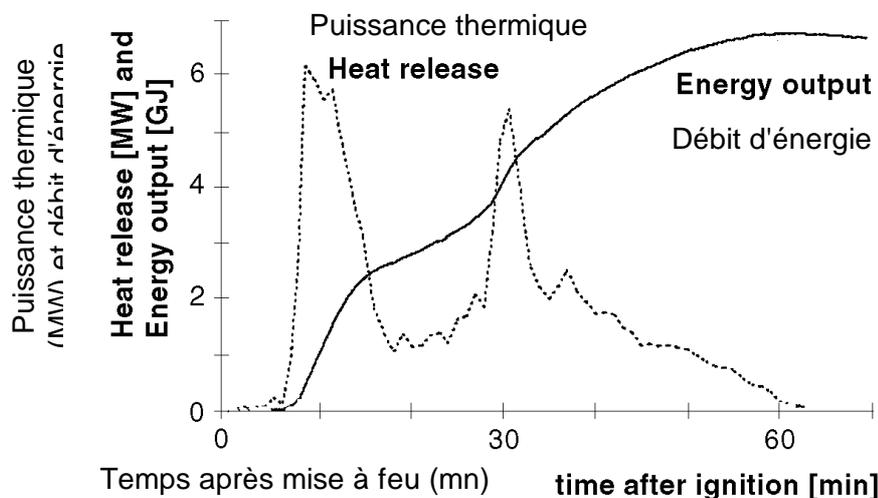


Figure 2.4.4 - Puissance thermique durant l'essai Eureka sur une voiture en matière plastique [20]

Figure 2.4.4 - Heat release during the Eureka test of a plastic passenger car [20]

En ce qui concerne la construction du tunnel, les scénarios KIVI [42] tiennent compte d'un incendie de 300 MW pour les tunnels immergés. Une proposition française préconise un incendie de 200 MW si un camion citerne d'essence est impliqué [47]. Une analyse de risque pour le tunnel d'Oresund [43] considère la possibilité d'une fuite de carburant à partir de brèches de diamètre équivalent à 15, 35 et 50 mm. Cela représente une défaillance potentielle d'un tuyau de carburant de petit diamètre ou un léger dégât sur une collerette de tuyau, mais ne représente pas la rupture complète d'un tuyau de livraison, ce qui équivaldrait à un orifice de 100 mm de diamètre. Le débit de la fuite dépend du diamètre de l'orifice et de la pression du liquide. Pour les orifices considérés, les débits massiques sont respectivement de 0,5, 2,7 et 5,6 kg/s.

Since then further advances have been achieved. In summarising the EUREKA fire tests in Norway and Finland, the PIARC data from Brussels and recent CETU proposals in France the following approximate maximum calorific power outputs may occur for a significant duration during fire events in tunnels [19; 20; 36] (example: figure 2.4.4; petrol tanker: see table 2.4.2):

- 1 small passenger car: 2.5 MW
- 1 large passenger car: 5 MW
- 2 - 3 passenger cars: 8 MW
- 1 van: 15 MW
- 1 bus: 20 MW
- 1 lorry with burning goods (general case): 20-30 MW

Larger vehicles (HGV) with burning goods and especially with dangerous goods may cause higher calorific power outputs. The EUREKA HGV fire test indicated a peak power output of approx. 100 to 120 MW, but during a very short period only.

Real peak powers will differ from the values given above because they depend on the type of vehicle, type of cargo, ventilation, burning rates, etc. For petrol tankers there is also a great influence due to the leakage opening produced by an accident and the capacity of the tunnel drainage system.

Table 2.4.2 - Effect of leakage diameter and drainage rate on the fire size of petrol tankers [43]

Tableau 2.4.2 - Effet du diamètre de la fuite et du taux de drainage sur la taille d'un incendie dû à un camion citerne d'essence [43]

		Calorific power [MW]			
Equivalent diameter of leakage [mm]	Leakage mass flow of petrol [kg/s]	Drainage mass flow of petrol			
		0 kg/s	1 kg/s	2 kg/s	5 kg/s
15	0.5	22	-	-	-
35	2.7	120	76	33	-
50	5.6	245	201	158	27
<i>Diamètre équivalent de la fuite [mm]</i>	<i>Débit massique de la fuite d'essence [kg/s]</i>	<i>0 kg/s</i>	<i>1 kg/s</i>	<i>2 kg/s</i>	<i>5 kg/s</i>
<i>Débit massique de drainage de l'essence</i>					
<i>Puissance thermique [MW]</i>					

With regard to the tunnel construction, KIVI scenarios [42] take a 300 MW fire for immersed tunnels into account. A French proposal claims a 200 MW fire if a petrol tanker is involved [47]. A risk analysis for the Oresund tunnel [43] considers the possibility of fuel leakage from ruptures of 15, 35, and 50 mm equivalent diameter. These represent the potential failure of small diameter fuel lines or a small damage of a delivery hose flange. They do not represent the complete rupture of a delivery hose which would give a hole diameter of 100 mm. The leakage flow depends on the diameter of the hole and the fluid pressure at the hole. For the holes considered the mass flows are 0.5, 2.7 and 5.6 kg/s respectively.

La capacité de drainage (de l'eau) des avaloirs dans ce tunnel est normalement 10 fois supérieure, mais il a été admis que, lors d'un accident, une obstruction peut limiter le débit du drainage [43]. Les calculs pour différents scénarios d'incendie ont donné des puissances thermiques comprises entre 22 et 245 MW (tableau 2.4.2).

La variation de la puissance thermique en fonction du temps pendant les expériences EUREKA ressemble fort au développement de la température (figures 2.4.2 et 2.4.3). Les modèles mathématiques doivent prendre en compte la puissance observée et les chutes de température.

#### II.4.4 Production de fumée et visibilité

En ce qui concerne le volume de fumée généré par les incendies de véhicules particuliers, autobus et camions, les hypothèses formulées dans le rapport AIPCR de Bruxelles ont été confirmées par les essais d'incendie EUREKA ([19 ; 20], tableau 2.4.3). Une récente proposition du CETU [47] avance des chiffres un peu plus élevés pour les camions et les camions citernes d'essence.

Tableau 2.4.3 - Production de fumée, de CO<sub>2</sub> et de CO [19 ; 20 ; 43 ; 44 ; 47 ; 48]

	Débit de fumée [m <sup>3</sup> /s]			Production de CO <sub>2</sub> (essais EUREKA) [kg/s]	Production de CO [kg/s]
	AIPCR 1987	Essais EUREKA	CETU (proposition ) 1996		
<b>Voiture particulière</b>	20	-	-	-	-
<b>Voiture particulière en matière plastique</b>	-	30	-	0,4 - 0,9	0,020 - 0,046
<b>2-3 voitures particulières</b>	-	-	30	-	-
<b>1 camionnette</b>	-	-	50	-	-
<b>Autobus / camion sans marchandises dangereuses</b>	60	50 - 60	80	1,5 - 2,5	0,077 - 0,128
<b>Poids lourd</b>	-	-	-	6,0 - 14,0	0,306 - 0,714
<b>Camion citerne</b>	100 - 200	-	300	-	-

L'étude comparée de la perte de visibilité due à la fumée, mesurée par la densité optique, et de la concentration de CO<sub>2</sub> indique une corrélation linéaire lorsqu'une correction est faite pour tenir compte de la température des gaz chauds [20 ; 43 ; 44 ; 48]. Lorsqu'un signal lumineux doit être perçu à une distance d'environ 10 m, la densité optique ne doit pas dépasser 0,13 m<sup>-1</sup> [49]. Lors des essais EUREKA, cette valeur critique correspondait à des concentrations de CO<sub>2</sub> d'environ 0,05 à 0,3 % seulement. Selon le matériau combustible, des valeurs maximales de CO<sub>2</sub> de 2 à 16 % ont été enregistrées. Ainsi, il y avait une production intense de fumée qui engendrait une visibilité très réduite en aval due à la puissance de l'incendie [48]. Dans une prochaine étape, ces calculs préliminaires seront poursuivis et les résultats correspondants seront communiqués dès que possible.

The drainage capacity (for water) of the gullies in this tunnel is normally 10 times greater but it was assumed that in an accident an obstruction could limit the amount of drainage [43]. The calculations for the different fire scenarios gave calorific power outputs between 22 MW and 245 MW (table 2.4.2).

The time dependence of the heat release during the EUREKA experiments closely resembles the temperature development (figure 2.4.2, figure 2.4.3). Mathematical models should account for the observed power and temperature dips.

#### II.4.4 Smoke production and visibility

For the smoke volume generation by fires of passenger cars, buses and lorries the assumptions of the PIARC Brussels report were confirmed by the EUREKA fire tests ([19; 20], table 2.4.3). A recent CETU proposal [47] includes somewhat higher numbers for lorries and petrol tankers.

Table 2.4.3 - Smoke, CO<sub>2</sub> and CO production [19; 20; 43; 44; 47; 48]

	Smoke flow [m <sup>3</sup> /s]			CO <sub>2</sub> production (EUREKA-tests) [kg/s]	CO production [kg/s]
	PIARC 1987	EUREKA-tests	CETU (proposal) 1996		
Passenger car	20	-	-	-	-
Passenger van (plastic)	-	30	-	0.4 - 0.9	0.020 - 0.046
2 - 3 passenger cars	-	-	30	-	-
1 van	-	-	50	-	-
Bus/lorry without dangerous goods	60	50 - 60	80	1.5 - 2.5	0.077 - 0.128
Heavy goods vehicle	-	-	-	6.0 - 14.0	0.306 - 0.714
Petrol tanker	100 - 200	-	300	-	-

The correlation of the smoke dependent visibility measured by the optical density and the concentration of CO<sub>2</sub> indicates a linear relation when a correction for the smoke gas temperature is made [20; 43; 44; 48]. On the assumption that a lighted signal should be perceived over a distance of about 10 m the optical density must not exceed 0.13 m<sup>-1</sup> [49]. During the EUREKA tests this critical value corresponded to CO<sub>2</sub> concentrations of approx. 0.05% to 0.3% only. Depending on the burning material maximum values of 2% to 16% CO<sub>2</sub> were observed. So, there was an intense smoke production leading to a very reduced visibility downstream from the fire load [48]. In a next step these preliminary calculations will be extended. Corresponding results will be reported when available.

## II.4.5 Monoxyde de carbone dans la fumée

Le caractère dangereux de la fumée dans les tunnels résulte non seulement de la perte de visibilité, mais également de la possible toxicité des gaz qu'elle contient. La concentration en monoxyde de carbone (CO) dans la fumée joue un rôle important dans ses effets toxiques (voir chapitre I de ce rapport).

Pendant les essais d'incendie EUREKA, le niveau de CO a été mesuré en différents points le long du tunnel. Dans une zone d'environ 20 à 30 m en aval des véhicules en combustion, les pointes de concentration de CO suivantes ont été mesurées à hauteur de visage [49] :

- |                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| • voiture particulière en plastique : | 300 ppm   |
| • autobus :                           | 2 900 ppm |
| • poids lourd :                       | 6 500 ppm |

Des concentrations de CO de plus de 500 ppm ont été atteintes 10 à 15 mn après le début de l'incendie ; elles ont duré environ deux heures pour l'incendie de l'autobus et environ 15 mn pour l'incendie du poids lourd. Durant une expérience réalisée avec une charge combustible mixte, des concentrations de CO de 500 ppm et plus ne se sont produites que 80 mn après le début de l'incendie [49] et ont duré 90 mn.

Les résultats EUREKA dépendent très largement du type de ventilation utilisé dans le tunnel lors des essais d'incendie. De plus, ils sont liés au type de matériau combustible. De fait, les résultats EUREKA ne peuvent être directement appliqués à d'autres tunnels. Cependant, ils indiquent qu'en aval des incendies, au moins pour les plus importants, il est besoin de prévoir la fuite et les secours en moins de 10 à 15 mn après le début de l'incendie. On peut également s'attendre à des concentrations dangereuses de CO dans la phase de progression d'un incendie de véhicule [49].

En analysant les essais EUREKA, une corrélation linéaire acceptable a été trouvée entre les vitesses de production de CO<sub>2</sub> et de CO [48]. Les rapports entre la production de masse de CO et la production de masse de CO<sub>2</sub> s'étendent d'approximativement 0,015 à 0,073 lorsque l'on se limite aux incendies de véhicules et de leurs chargements [48]. Cela amène à un rapport moyen de 0,051 pour un écart type de  $\pm 0.015$ . Cette moyenne est utilisée pour le calcul des vitesses de production de CO présentées au tableau 2.4.3.

## II.5 Scénarios d'incendie de dimensionnement

Les sections précédentes présentaient des informations importantes sur la probabilité des incendies et le dégagement de chaleur et de substances toxiques observés en réalité et au cours d'essais d'incendie en vraie grandeur. Dans ce contexte, un certain nombre de scénarios d'incendies doivent être conçus pour atteindre une stratégie optimale de prévention des incendies dans les tunnels. Jusqu'à présent, seuls quelques sujets spécifiques sont décrits dans les scénarios d'incendies. Il devrait y avoir des scénarios d'incendies pour :

- l'ingénierie de la structure des tunnels,
- les essais de matériaux pour la structure et l'équipement du tunnel,
- le choix du système de ventilation,
- l'exploitation du tunnel,
- la formation du personnel devant affronter un incendie.

## II.4.5 Carbon monoxide in smoke gases

The dangerous nature of smoke gases in tunnel facilities not only results from the visibility-obscuring effect but also from their possible toxicity. The concentration of carbon monoxide (CO) in smoke gases plays a major part in their toxic effect (see section I of this report).

During the EUREKA fire tests the CO level was monitored at several measuring points along the tunnel. In the region from about 20 m to 30 m downstream of the burning vehicles the following peak CO concentrations were measured at head height [49]:

- |                            |           |
|----------------------------|-----------|
| • passenger van (plastic): | 300 ppm   |
| • public bus:              | 2 900 ppm |
| • heavy goods vehicle:     | 6 500 ppm |

CO concentrations of more than 500 ppm were exceeded from about 10 to 15 minutes from the start of the fire and lasted about 2 hours during the bus fire and about 15 minutes during the heavy goods vehicle fire. During an experiment with a mixed fire load CO concentrations of 500 ppm and more occurred not before about 80 minutes after the start of the fire [49] and lasted for 90 minutes.

These EUREKA results depend very much on the different ventilation of the test tunnel during the fire tests. Further they are related to the type of burning material. So the EUREKA results may not be transferred directly to other tunnels. However, the EUREKA results indicate that downstream of fires there is, at least for bigger fires, a need for escape and rescue within about 10 to 15 minutes from the start of a fire. Harmful CO concentrations should be expected also in the progressive stage of vehicle fires [49].

When analysing the EUREKA tests, a reasonable linear correlation between the production rates of CO<sub>2</sub> and CO was found [48]. The ratios of CO mass production to CO<sub>2</sub> mass production cover a span from approx. 0.015 to 0.073 when restricting to vehicle and vehicle load fires [48]. This gives on the average a ratio of 0.051 with a standard deviation of  $\pm 0.015$ . This average is used for the calculation of the CO production rates given in table 2.4.3.

## II.5 Design fire scenarios

The preceding chapters summarised important information about the probability of fires and the release of heat and toxic substances as observed in reality and 1:1 fire tests. Against this background a number of fire scenarios must be designed to get at an optimum fire prevention strategy for road tunnels. Up to now only special topics are covered by a description of fire scenarios. There should be fire scenarios for:

- tunnel structure engineering,
- material testing for tunnel structures and equipment,
- the choice of ventilation systems,
- the operation of the tunnel, and
- the training of staffs dealing with a tunnel fire.

Ces scénarios d'incendies devraient inclure :

- des directives pour leur sélection,
- une description du but du scénario,
- une définition très précise des paramètres d'incendie (par exemple, puissance thermique en fonction du temps),
- les conditions de circulation, lorsque l'on traite de la ventilation du tunnel et de son exploitation,
- des directives pour l'établissement des essais de matériaux,
- des spécifications pour les matériaux, les équipements et les structures par rapport aux stratégies de prévention des incendies.

Des exemples de spécifications sur les essais de matériaux existent entre autres dans les réglementations allemandes et néerlandaises (RWS-Curve [42], ZTV-Tunnel [45]). Un important paramètre de classement est la température des armatures du béton qui ne doit pas dépasser environ 300 °C. En ce qui concerne la conception de la ventilation et l'exploitation du tunnel, les paramètres les plus importants sont la taille et le nombre de véhicules impliqués (puissance de l'incendie), les conditions de circulation au moment du déclenchement de l'incendie (par exemple, circulation saccadée), le type de circulation (uni- ou bidirectionnelle), la ventilation naturelle du tunnel et les possibilités de fuite pour les usagers en présence de chaleur, fumée et gaz toxiques.

Parmi les différents types possibles d'incendies, les suivants doivent être examinés :

- les incidents impliquant un seul véhicule (voiture, autobus, camion, citerne d'essence),
- les collisions (de deux à trois véhicules particuliers, d'une voiture particulière avec un camion ou un autobus, d'un autobus avec un camion).

Pour la conception, il ne paraît cependant pas nécessaire d'envisager les pires cas alors que leur probabilité de se produire est très faible. Par exemple, très rares sont les incendies qui résultent d'une collision alors que ce type d'incident provoque les puissances thermiques et les températures les plus élevées. Mais lorsque les conséquences peuvent être catastrophiques (par exemple, la rupture d'un tunnel immergé), de tels scénarios doivent être envisagés lors du projet.

Les conséquences des incendies dans les conditions suivantes de circulation doivent être approfondies selon les caractéristiques du tunnel (par exemple, tunnel urbain) :

- trafic congestionné (par exemple, heures de pointe),
- embouteillage (dû par exemple à un autre accident),
- circulation dense, mais fluide (par exemple, probabilité accrue d'incidents multiples entre véhicules).

Les plus mauvaises conditions ne sont généralement pas prises en compte lors du dimensionnement, selon un équilibre entre les coûts additionnels de construction et d'exploitation, et l'importance des risques (probabilité et conséquences).

These fire scenarios should include:

- guidelines for their selection,
- a description of the aim of the scenario,
- a thorough definition of the fire parameters (e.g. heat release versus time),
- the traffic situation encountered when dealing with questions about tunnel ventilation and operation,
- guidelines for the set-up of material tests, and
- specifications to be fulfilled by material, equipment and structure with regard to fire prevention strategies.

Examples of specifications about material testing are found in Dutch and German regulations for instance (RWS-Curve [42], ZTV-Tunnel [45]). An important rating parameter is the temperature at the concrete reinforcement which should not exceed approx. 300 °C. With regard to the ventilation design and the operation of the tunnel the most important items are the size and number of vehicles (fire load) involved, the traffic situation at the time of the outbreak of the fire (e.g. a stop and go-situation), the mode of traffic flow (e.g. uni or bi-directional), the natural ventilation of the tunnel and the escape possibilities for people in the presence of heat, smoke and toxic gases.

Among the possible fire loads the following vehicle fires should be examined:

- incidents with one vehicle (car, bus, lorry, petrol tanker),
- collision incidents (collision of two to three passenger cars, collision of a passenger car with a lorry or bus, collision of a bus with a lorry).

However, worst cases should not necessarily be considered for design when their probability is very low. For instance very few fires result from a collision whilst this case leads to the highest heat release rates and temperatures. If the consequences may be catastrophic (e.g. collapse of an immersed tunnel), such very severe scenarios should be taken into account for design.

The consequences of fire incidents in the following traffic situations should be investigated according to the characteristics of the tunnel (e.g. urban tunnel):

- congested traffic (e.g. rush hours),
- traffic jam (e.g. due to another accident),
- flowing dense traffic (e.g. increased probability of multiple vehicle incidents).

Also worst conditions are generally not considered in design, depending on a balance between extra construction/operational costs and importance of risk (probability and consequences).

En ce qui concerne l'efficacité des équipements d'évacuation et de secours, les points suivants doivent être étudiés :

- disponibilité d'équipements de lutte contre l'incendie (par exemple, extincteurs),
- disponibilité d'équipements permettant de détecter l'incendie et/ou d'informer l'exploitation du tunnel,
- délai le plus court et délai moyen d'arrivée des pompiers,
- disponibilité des issues d'évacuation,
- capacité du système de ventilation en cas d'urgence,
- capacité de désenfumage du système de ventilation,
- gestion de la circulation pour permettre la sortie du tunnel aux véhicules non impliqués et qui se retrouvent en aval de l'incendie.

Ces sujets sont régulièrement couverts dans les activités des bureaux d'étude pour des projets de tunnels spécifiques. Une plus grande normalisation serait très utile pour développer et préparer, par exemple, des stratégies de ventilation pour des situations d'urgence.

Dans l'ensemble, un large éventail de scénarios d'incendies de dimensionnement est possible selon l'objectif : construction de tunnel, équipement, exploitation. Cependant, le but des futurs travaux est de sélectionner les incendies de dimensionnement les plus importants et de préparer une courte description des scénarios d'incendie, comme le montrent les premiers exemples du tableau 2.5.1.

## **II.6 Recommandations pour des travaux futurs**

Selon les éléments présentés dans ce chapitre, les futurs travaux sur le risque incendie devraient porter sur :

- analyses des incendies et essais pour spécifier de manière plus détaillée la production de CO et de suies et la zone à visibilité réduite,
- définition plus précise des scénarios d'incendie,
- publication de directives pour les essais d'incendie et leur évaluation (par exemple, pour les revêtements résistant aux incendies).

With regard to effective escape and rescue possibilities the following items should be considered:

- availability of fire fighting equipment (e.g. fire extinguishers),
- availability of equipment to detect the fire and/or inform the tunnel operator,
  
- earliest and average arrival time of the fire brigade,
- availability of emergency exits,
- emergency capacity of the ventilation system,
- smoke removal capacity of the ventilation system,
- traffic enforcement to get and keep not involved vehicles downstream of fire out of the tunnel.

These topics are regularly covered in consulting activities for specific tunnel projects. More standardisation would be very helpful for developing and preparing e.g. ventilation strategies for emergency situations.

On the whole a broad spectrum of design fire scenarios is possible regarding their different aims (tunnel construction, equipment, tunnel operation). Therefore the intention of the further work is to select the most important design fires and to prepare a short description of the fire scenarios like the first examples in table 2.5.1.

## **II.6 Recommendations for further work**

According to the preceding chapters of this section further work on fire risk should be devoted to:

- analysis of fire events and tests to specify the production of CO, soot and light-absorbing area more comprehensively,
- defining of fire scenarios in more detail, and
- issuing of guidelines for fire tests and their evaluation (e.g. with regard to fire-resistant coatings).

Tableau 2.5.1 - Exemples de scénarios d'incendie de dimensionnement

Scénarios d'incendie		Conditions importantes qui doivent être remplies	Description de l'incendie de dimensionnement	Exemples de normes nationales correspondantes
n°.	Sujet			
1	Essai de matériau de construction pour des structures de tunnel immergé en béton armé, lorsque le transport de marchandises dangereuses, comme les camions citernes d'essence, est autorisé	<ul style="list-style-type: none"> <li>- la température à l'interface des panneaux d'isolation thermique et du béton de la structure du tunnel ne doit pas dépasser 380 °C.</li> <li>- la température des armatures métalliques ne doit pas dépasser 250 °C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- courbe température-temps dans le four d'essai selon la courbe RWS</li> <li>- température maximale 1 350 °C, durée du test : 2 heures</li> </ul>	Directives néerlandaises K.I.V.I. et du Rijkswaterstaat [42]
2	Essai de matériau de construction pour des structures de tunnel en béton armé, lorsque : <ul style="list-style-type: none"> <li>- les marchandises dangereuses sont autorisées,</li> <li>- une rupture immédiate du tunnel ou une arrivée d'eau ne sont pas à craindre</li> </ul>	La température des armatures métalliques ne doit pas dépasser 300 °C.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- courbe température-temps dans le four d'essai selon la courbe ZTV-Tunnel</li> <li>- température maximale 1 200 °C, durée du test : 1 heure 50 mn (phase de refroidissement incluse)</li> </ul>	ZTV Tunnel, Allemagne [45]
3	Essai d'accélérateurs pour les systèmes de ventilation longitudinale	Les accélérateurs et les équipements d'alimentation électrique doivent fonctionner au moins 90 mn, lorsque l'air chaud et la fumée (température : 250 °C) les traversent et les entourent	Les équipements d'essai doivent pouvoir produire de l'air additionné de suies chaudes d'une température de 250 °C pendant au moins 90 mn.	RABT 1994, Allemagne [50]
4	Dimensionnement d'un système de ventilation longitudinale avec accélérateurs, capable de contrôler un incendie de camion produisant une puissance calorifique d'environ 20 MW.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- suffisamment de puissance pour propulser la fumée dans un sens du tunnel (par exemple, prise en compte de la perte de poussée des accélérateurs sous l'air chaud)</li> <li>- choix de l'emplacement des accélérateurs le long du tunnel afin d'en placer suffisamment pour le désenfumage dans les cas où certains d'entre eux seraient endommagés par l'incendie</li> <li>- disponibilité d'un mode de fonctionnement des ventilateurs qui permet de conserver des itinéraires d'évacuation libres de toute fumée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- données d'incendie: voir n° 2</li> <li>- production de fumée : environ. 60 m<sup>3</sup>/s (à une température de référence de 300 °C)</li> </ul>	RABT 1994, Allemagne [50]

Table 2.5.1 - Examples of design fire scenarios

Fire scenarios		Important requirements, which have to be met	Description of the design fire	Examples of related national standards
n°.	Purpose			
1	test of construction material for immersed reinforced concrete tunnel structures, when passing of dangerous goods like petrol tankers is allowed	<ul style="list-style-type: none"> <li>- temperature at the interface of heat insulation panels and the concrete of the tunnel structure may not exceed 380 °C</li> <li>- temperature at the steel reinforcement of the tunnel structure may not exceed 250 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- time dependence of the temperature in the test oven according to the RWS curve</li> <li>- maximum temperature 1350 °C duration of the test burning: 2 hours</li> </ul>	Dutch K.I.V.I. and Rijkswaterstaat guidelines [42]
2	test of construction material for reinforced concrete tunnel structures, when: <ul style="list-style-type: none"> <li>- dangerous good are allowed and</li> <li>- an immediate tunnel collapse or water-intake is not anticipated</li> </ul>	temperature at the steel reinforcement of the tunnel structure may not exceed 300 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- time dependence of the temperature in the test oven according to the ZTV-Tunnel</li> <li>- maximum temperature 1200 °C duration of the test burning: 1 hour 50 minutes (decline phase incl.)</li> </ul>	ZTV-Tunnel, Germany [45]
3	test of jet fans for longitudinal ventilation systems	the jet fans and their related equipment for the electrical power supply must work at least 90 minutes, when hot air and smoke (temperature: 250 °C) is flowing through them and surrounding them	the test equipment must be able to deliver hot soot enriched air of a temperature of 250 °C for at least 90 minutes.	RABT 1994, Germany [50]
4	designing of a longitudinal ventilation system with jet fans capable to control a lorry fire event with a calorific heat output of approx. 20 MW	<ul style="list-style-type: none"> <li>- enough power to push the smoke into one direction of the tunnel (e.g. account for thrust loss of fans in hot air)</li> <li>- choice of fan distribution along the tunnel for retaining enough fans for smoke control when some fans are damaged due to the fire</li> <li>- availability of a fan operation mode which keeps emergency paths free from smoke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fire data: see no. 2</li> <li>- smoke generation: approx. 60 m<sup>3</sup>/s (at a reference temperature of 300 °C)</li> </ul>	RABT 1994, Germany [50]