

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 ³ 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 m³/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 ³ 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 m³/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 m³ 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 m³ 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.

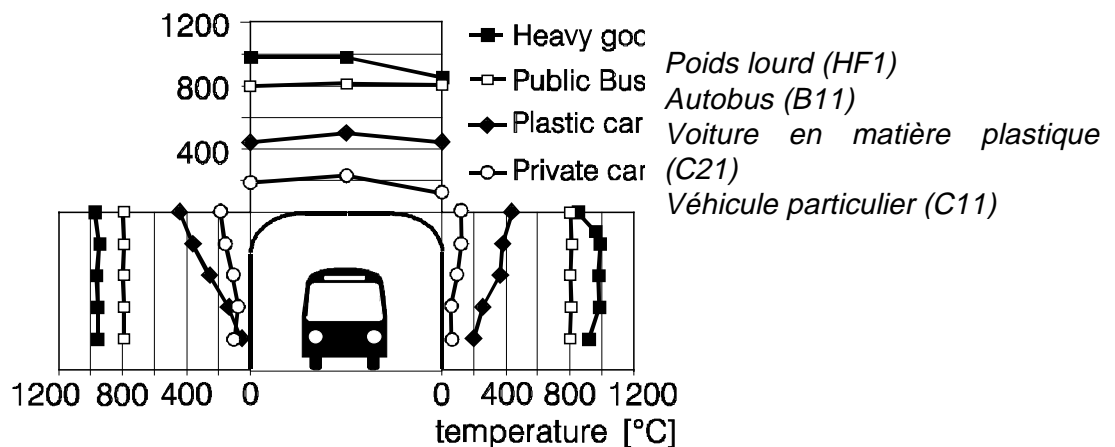


Figure 2.4.1 - Maximum temperatures in the cross-section of the tunnel during tests with road vehicles [20]

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.

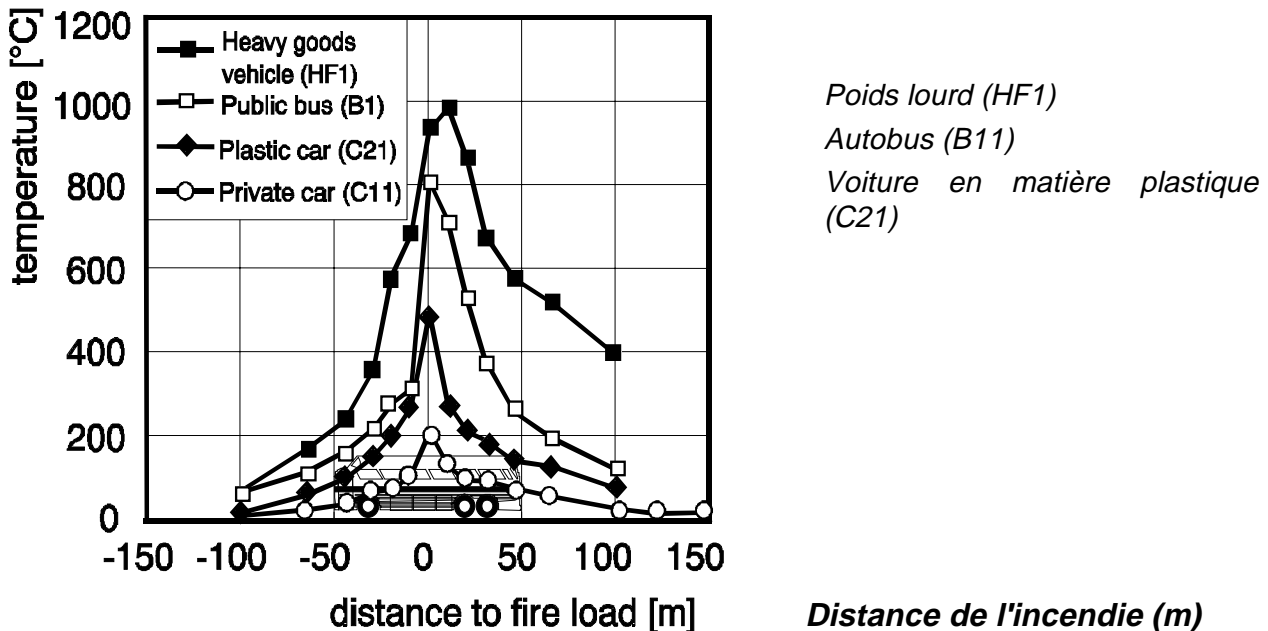


Figure 2.4.2 - Températures maximales au niveau du plafond du tunnel lors d'essais avec des véhicules routiers [20]

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).

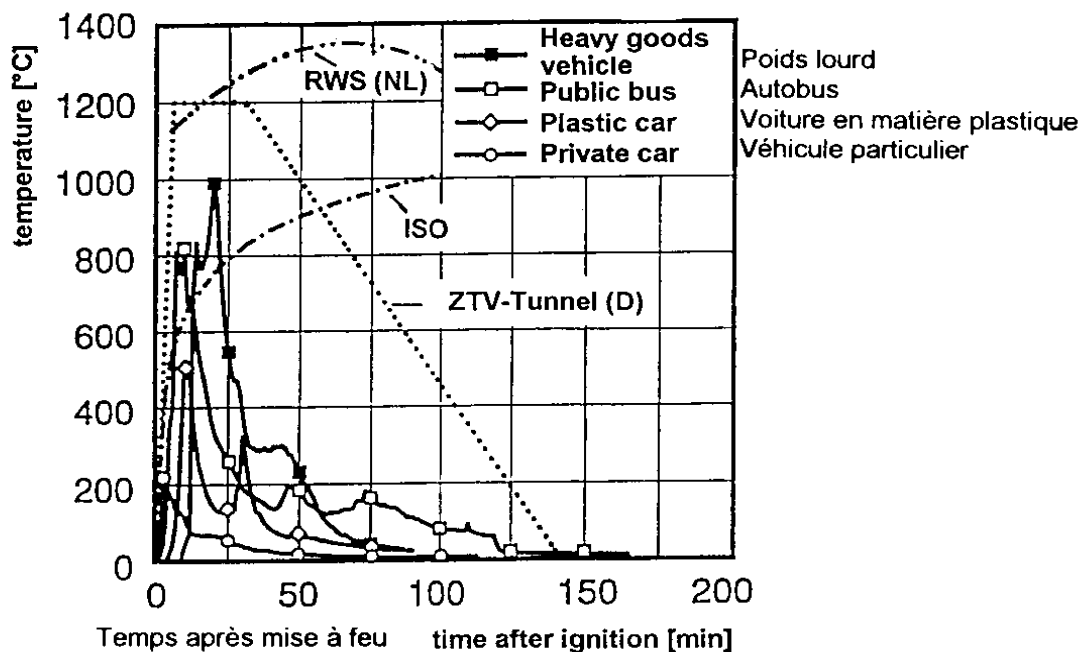


Figure 2.4.3 - Time dependency of temperatures in Eureka tunnel fires and standard curves used in regulations upon fire protection [43; 44; 45]

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.

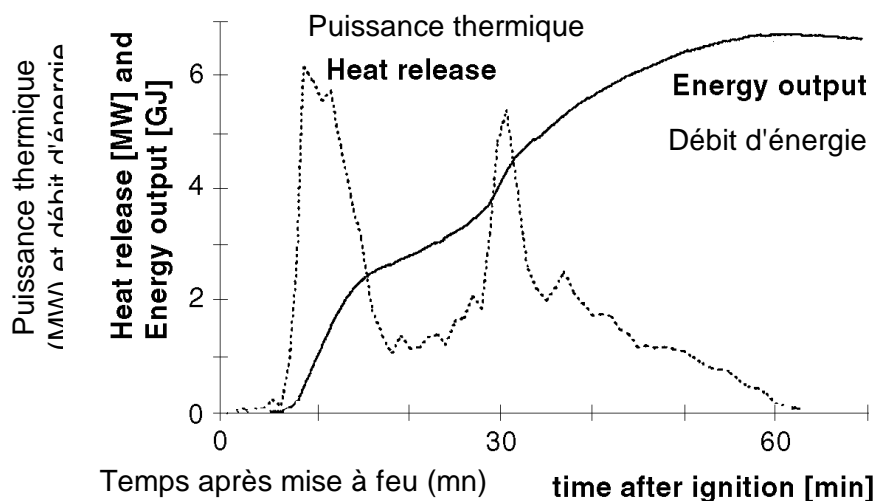


Figure 2.4.4 - Puissance thermique durant l'essai Eureka sur une voiture en matière plastique [20]

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 CO₂ et de CO [19 ; 20 ; 43 ; 44 ; 47 ; 48]

	Débit de fumée [m ³ /s]			Production de CO ₂ (essais EUREKA) [kg/s]	Production de CO [kg/s]
	AIPCR 1987	Essais EUREKA	CETU (proposition) 1996		
Voiture particulière	20	-	-	-	-
Voiture particulière en matière plastique	-	30	-	0,4 - 0,9	0,020 - 0,046
2-3 voitures particulières	-	-	30	-	-
1 camionnette	-	-	50	-	-
Autobus / camion sans marchandises dangereuses	60	50 - 60	80	1,5 - 2,5	0,077 - 0,128
Poids lourd	-	-	-	6,0 - 14,0	0,306 - 0,714
Camion citerne	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 CO₂ 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⁻¹ [49]. Lors des essais EUREKA, cette valeur critique correspondait à des concentrations de CO₂ d'environ 0,05 à 0,3 % seulement. Selon le matériau combustible, des valeurs maximales de CO₂ 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, CO₂ and CO production [19; 20; 43; 44; 47; 48]

	Smoke flow [m ³ /s]			CO ₂ 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 CO₂ 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⁻¹ [49]. During the EUREKA tests this critical value corresponded to CO₂ concentrations of approx. 0.05% to 0.3% only. Depending on the burning material maximum values of 2% to 16% CO₂ 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 CO₂ et de CO [48]. Les rapports entre la production de masse de CO et la production de masse de CO₂ 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 ± 0.015 . Cette moyenne est utilisée pour le calcul des vitesses de production de CO présentées au tableau 2.4.3.

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 CO₂ and CO was found [48]. The ratios of CO mass production to CO₂ 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 ± 0.015 . This average is used for the calculation of the CO production rates given in table 2.4.3.