

III.4 Développement et dispersion de la fumée lors d'essais d'incendie

III.4.1 Essais utilisant l'essence comme combustible (Ofenegg et Zwenberg)

Afin d'obtenir au moins un aperçu général sur les conditions de température et les quantités de fumée à prévoir lors d'un incendie dû à de l'essence, des essais furent réalisés très tôt dans le tunnel suisse de l'Ofenegg [53] et dans le tunnel autrichien du Zwenberg [54]. Ces deux tunnels étaient des tunnels ferroviaires désaffectés. La section transversale totale des tunnels du Zwenberg et de l'Ofenegg était d'environ 24 m^2 , ce qui est bien plus faible que la section transversale d'un tunnel routier traditionnel à deux voies, qui est comprise entre 45 m^2 et 60 m^2 .

Que ce soit dans le tunnel de l'Ofenegg ou dans celui du Zwenberg, l'essence a été versée dans un bac en béton et ensuite enflammée. L'essence utilisée était de l'essence ordinaire (86 % de carbone et 14 % d'hydrogène), de masse volumique $\rho = 730 \text{ kg/m}^3$ (à 15 °C) et de capacité calorifique inférieure d'environ 44 MJ/kg . La vitesse de combustion de l'essence à l'air libre est fonction de la surface du foyer : tout d'abord, elle augmente au fur et à mesure que le foyer grossit, ensuite elle reste constante lorsque le foyer de l'incendie atteint une surface d'environ 1 m^2 . Selon les références [25] et [55], la vitesse de combustion est de $0,08 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ à $0,1 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ à l'air libre.

Cependant, dans un tunnel, les conditions sont quelque peu plus compliquées qu'à l'air libre. Le plafond et les piédroits restreignent l'écoulement de la fumée. Puisqu'il n'y a pas d'apport artificiel d'air frais envoyé directement sur le foyer, l'air frais peut seulement être fourni de deux côtés. Dans tous les cas de ventilation, les conditions de combustion sont plus mauvaises (moins d'oxygène) qu'à l'air libre. A l'air libre, le flux d'air frais voyage sans obstacles des limites extérieures du foyer vers son centre et la fumée peut facilement s'évacuer. Les essais d'incendie (dans le tunnel du Zwenberg) ont démontré que, selon les dispositions de l'essai, la vitesse de combustion dans le tunnel était plus faible que celle des incendies à l'air libre dont elle ne représente que 52 à 65 %. Lorsque de très grandes surfaces sont recouvertes d'essence, ce facteur peut être largement plus faible. La concentration en surface (quantité de combustible par surface totale du bac) dans le tunnel du Zwenberg était : $f = 29,4 \text{ l/m}^2$, et dans le tunnel de l'Ofenegg, elle était au plus de la moitié.

However, since the smoke releases its heat at the tunnel walls, it cools down and flows down on both sides at the walls. Hence a pair of vortices develops: they bring the smoke down near the cold walls and produce an upward flow in the middle of the tunnel. If there is a vehicle in the tunnel, a pair of opposite vortices appears [58]. Because of the low pressure downstream the vehicle, the smoke flows down in the middle and streams upward near the tunnel walls. All these vortices make the smoke come down at some distance from the fire site and destroy the smoke-free ground zone. The following paragraphs provide a detailed description of how the smoke disperses in specific tunnel fires.

III.4 Smoke development and dispersal of smoke in fire tests

III.4.1 Fire tests using petrol as a fire source (Ofenegg and Zwenberg fire tests)

In order to gain at least a general insight into the temperature conditions and the amounts of smoke to be expected from a petrol fire, tests were performed very early in the Swiss Ofenegg tunnel [53] and the Zwenberg tunnel in Austria [54], both of them being abandoned railroad tunnels. The total cross-sectional area of the Zwenberg and Ofenegg tunnels was approx. 24 m² which is much smaller than the cross-sectional area of normal road tunnels with two lanes, which is between 45 m² and 60 m².

In the Ofenegg tunnel as well as in the Zwenberg tunnel, petrol was poured into a concrete tub and then ignited. The petrol used was regular petrol (86% carbon and 14% hydrogen) with a density of $\rho = 730 \text{ kg/m}^3$ (at 15 °C) and a lower calorific value of approx. 44 MJ/kg. The rate of burning of petrol in free air is a function of the fire area: first it increases as the fire site increases in size, then it remains constant when the fire site reaches an area of approx. 1 m². According to references [25] and [55], the rate of burning is 0.08 l/(m².s) to 0.1 l/(m².s) in the open.

In a tunnel, however, the conditions are much more complicated than in the open. The tunnel ceiling and the walls restrict the flow of the smoke. If there is no artificial fresh air supply sending air directly to the fire site, fresh air can only be supplied from two sides. In every possible ventilation case, the burning conditions are worse (less oxygen) than in the open. In the open, the flow of fresh air from the borders of the fire site into the centre of the fire is unhindered, and the smoke can easily flow off. The fire tests (in the Zwenberg tunnel) have shown that, depending on the test arrangement, the rate of burning in the tunnel was lower by the factor 0.52 to 0.65 compared to the fires in the open. When very large areas are covered with gasoline, this factor may be significantly lower. The area concentration (fuel amount per total tub area) in the Zwenberg tunnel was $f = 29.4 \text{ l/m}^2$, and in the Ofenegg tunnel it was only half as much.

Schweiger [56] a réalisé une évaluation thermodynamique des essais du tunnel du Zwenberg pour une quantité de combustible de 200 l d'essence ordinaire. Pour une flaque de 7 m², l'énergie totale disponible était de 6 410 MJ. Une combustion stœchiométrique supposée cela aboutit à une masse totale de produit de combustion (fumée) de 2 322 kg (besoins en air et en essence pour la combustion). Une combustion stœchiométrique est le résultat de la combustion de l'essence avec le minimum d'air nécessaire. Pendant l'incendie du tunnel, il n'y avait pas une combustion stœchiométrique.



Photo 3.1 - Exemple de développement de fumée pendant un essai d'incendie dans un tunnel près de Monaco

Photo 3.1 - Example of smoke development during a fire test in a tunnel near Monaco

En plus des composants CO₂ et H₂O résultant d'une combustion stœchiométrique, se sont également formés du CO et du NO_x. Cependant, la quantité de ces derniers était faible (en concentration), ce qui signifie qu'il n'est pas nécessaire de les prendre en compte lors de l'équilibre thermodynamique. L'évaluation était ensuite fondée sur l'hypothèse qu'il ne pouvait y avoir de condensation de vapeur d'eau dans la fumée.

La figure 3.4.1 montre la production par combustion stœchiométrique (CO₂, H₂O et N₂ non brûlé) dans le tunnel en fonction de la durée de l'incendie pour 200 l d'essence ordinaire. On peut observer que la totalité de l'essence brûle en 10 mn environ. Au début, les produits de combustion montrent un accroissement linéaire rapide. Après 400 secondes, 2 100 kg de fumée ont été produits. Ensuite, la production de fumée décroît fortement, et après 620 secondes, l'essence est totalement brûlée. Durant les 400 premières secondes, la puissance thermique était d'environ 15 MW.

L'évolution de cet incendie était pour l'essentiel indépendante du type de ventilation (transversale, transversale sans apport d'air frais, semi-transversale, longitudinale avec une vitesse de l'air de 2 m/s). Le système de ventilation était conçu pour fournir 30 m³/s d'air frais et aspirer 30 m³/s d'air vicié sur une longueur de 400 m. Ainsi, dans le cas de la ventilation transversale, il était possible d'extraire de l'espace de circulation la totalité de la fumée sur une distance d'environ 200 m.

Schweiger [56] made a thermodynamic evaluation of the fire tests in the Zwenberg tunnel for a fuel mass of 200 l of regular petrol. In a 7 m² pool area the total available fuel energy was 6410 MJ. Based on an assumed stoichiometric combustion, this results in a total combustion product (smoke) amount of 2322 kg (fuel and air requirements for combustion). A stoichiometric combustion product amount is the result of the complete combustion of fuel with the necessary minimum amount of air. During the tunnel fire there was no stoichiometric combustion.

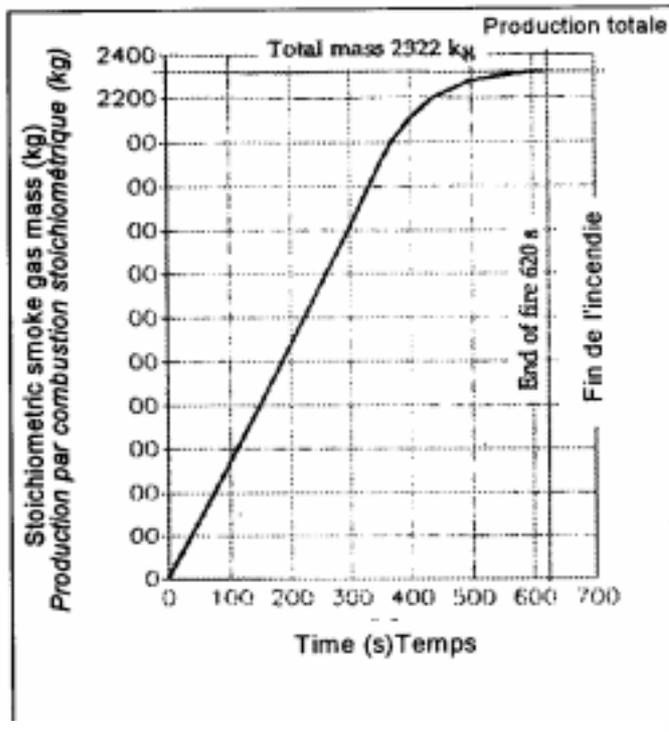


Figure 3.4.1
Mass of smoke produced
with 200 l of gasoline

Figure 3.4.1
Quantité de fumée
produite par 200 l d'essence

In addition to the components CO₂ and H₂O resulting from a stoichiometric combustion, CO and NO_x were formed as well. However, the amount of these components was small (within the ppm range), which means that they can be neglected in the thermodynamic balance. The evaluation was further based on the assumption that no condensation of the water vapour contained in the smoke took place.

Figure 3.4.1 shows the stoichiometric combustion product mass (CO₂, H₂O and unburned N₂) in the

tunnel depending on the duration of the fire for 200 l of regular petrol. It can be seen that the complete fuel mass is burned within approx. 10 minutes. At the beginning, there is a rapid linear increase in the combustion product mass. After 400 seconds, 2100 kg of smoke have been produced. Then the production of smoke decreases greatly, and after 620 seconds the fuel is completely burned. During the first 400 seconds the thermal output amounted to approx. 15 MW.

The progress of this fire was essentially independent of the type of ventilation (transverse ventilation, transverse ventilation without fresh air supply, semi-transverse ventilation, and longitudinal ventilation with an air velocity of 2 m/s). The ventilation system was designed to supply 30 m³/s of fresh air and to withdraw 30 m³/s of exhaust air over a length of 400 m. Thus it was possible in the case of the transverse ventilation to withdraw the complete amount of smoke produced from the traffic space within a distance of approx. 200 m.

Pour convertir les masses de fumée en volumes, il est nécessaire de connaître la température de la fumée. Les températures théoriques de combustion stœchiométrique de l'essence ordinaire sont d'environ 2 000 °C. Les températures réelles en cas d'incendie sont généralement plus faibles, principalement parce que la combustion n'est pas stœchiométrique, ou parce que la fumée se mélange à l'air.

Les essais réalisés dans les tunnels de l'Ofenegg et du Zwenberg ont montré que les températures maximales le long du plafond au-dessus du foyer de l'incendie variaient entre 800 et 1 200 °C.

La figure 3.4.2 montre la distribution générale de la température dans le tunnel en fonction du temps dans le cas d'une ventilation longitudinale avec une vitesse longitudinale de 2 m/s. La température est la moyenne de toutes les mesures de température effectuées sur une section test.

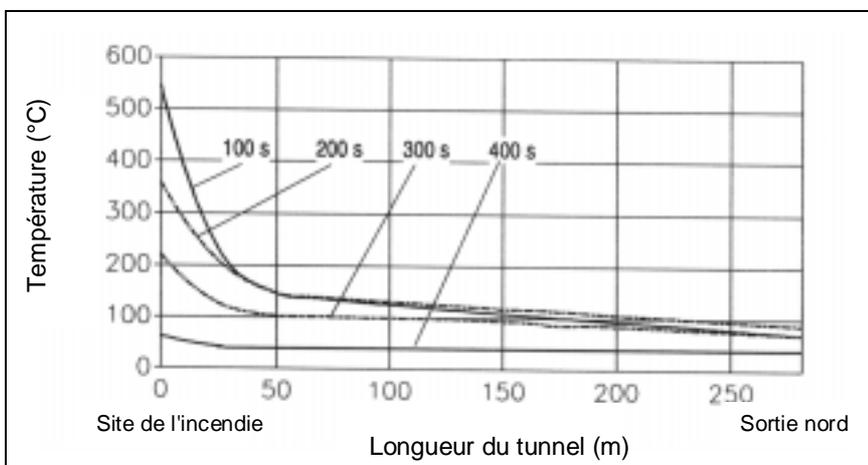


Figure 3.4.2 – Distribution de la température mesurée le long du tunnel à une vitesse longitudinale de 2 m/s

Figure 3.4.2 - Temperature progression measured along the tunnel length at a longitudinal velocity of 2 m/s

La figure 3.4.3 montre la situation avec une vitesse longitudinale un peu plus élevée (4 m/s).

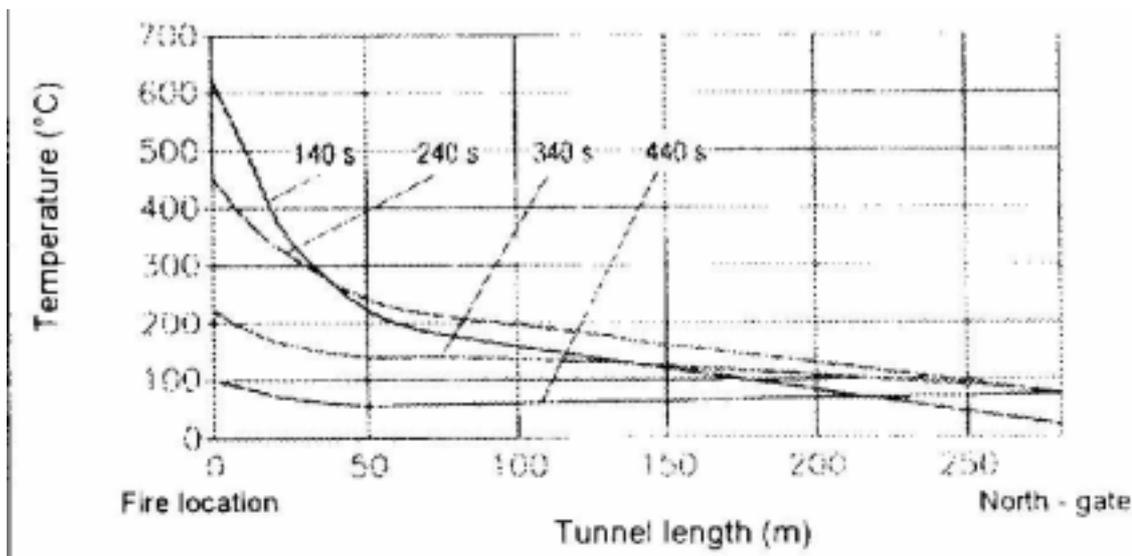
Il est difficile de comparer directement les deux résultats, puisque l'évolution de la température est seulement disponible à des laps de temps différents (ramener les chiffres aux mêmes temps n'est pas possible).

De plus, le facteur suivant doit être pris en compte : dans le cas de vitesses longitudinales plus basses, les flammes ne sont que modérément redirigées dans le sens du courant d'air. On peut noter une légère remontée des fumées le long du plafond, à contre-courant du flux principal. Cependant, dans le cas de vitesses longitudinales plus grandes, les gaz de fumée sont totalement redirigés dans la direction du courant d'air. En général, on peut dire que les températures des fumées jusqu'à une distance d'environ 200 m sont plus élevées dans le cas de vitesses longitudinales de 4 m/s que dans le cas de vitesses longitudinales plus basses. A partir d'une distance de 200 m, cependant, les températures sont plus faibles en raison de la vitesse longitudinale élevée et de l'effet de l'échange thermique avec la paroi.

In order to convert the smoke masses produced to smoke volumes it is necessary to know the smoke temperatures. The theoretical stoichiometric combustion temperatures of regular gasoline are about 2000 °C. The real fire temperatures are usually much lower, mainly because the combustion is not stoichiometric, or because the smoke mingles with air.

The fire tests performed in the Ofenegg tunnel and in the Zwenberg tunnel showed that the maximum local temperatures along the ceiling above the fire site were between 800 °C and 1200 °C.

Figure 3.4.2 shows the main temperature distribution in the tunnel relative to time in the case of a longitudinal ventilation with a longitudinal velocity of 2 m/s. The temperature is the mean value of all temperature measurements performed in one measuring cross-section.



<p>Figure 3.4.3 - Temperature progression measured along the tunnel length at a longitudinal velocity of 4 m/s</p>	<p>Figure 3.4.3 - Distribution de la température mesurée le long du tunnel à une vitesse longitudinale de 4 m/s</p>
--	---

Figure 3.4.3 shows the conditions with a slightly higher longitudinal velocity of 4 m/s.

It is not possible to directly compare the two measurement results with each other, since the temperature distribution is only available for different times (converting the figures to the same times is not possible).

In addition, the following fact must be considered as well: in the case of lower longitudinal velocities, the flames are being redirected into the flow direction only to a small extent. There is still a minor backlayering of the flue gases along the ceiling, which is directed against the main flow. In the case of higher longitudinal velocities, however, the flue gases are completely redirected toward the flow direction. In general it can therefore be said that the flue gas temperatures up to a distance of approximately 200 m are higher in the case of higher longitudinal velocities of 4 m/s than in the case of lower longitudinal velocities. As of a distance of 200 m, however, temperatures decrease due to the higher longitudinal velocity and the resulting improvement in the heat transition into the rock.

Lors de l'utilisation d'une ventilation semi-transversale réversible ou d'une ventilation transversale, le système de ventilation doit être basculé aussi vite que possible de l'état de fonctionnement normal à l'état de fonctionnement en mode d'incendie (maximum d'air vicié, 0 à 25 % d'air frais à l'intérieur de la zone d'incendie ; voir V.5.4).

Que ce soit dans le cas d'une ventilation transversale ou d'une ventilation semi-transversale réversible, la réduction de température dans l'espace de circulation fut plus élevée. Cela est dû au fait qu'en s'éloignant du foyer, de plus en plus de fumée est aspirée dans la gaine d'extraction, libérant ainsi l'espace de circulation de toute fumée.

Les calculs [57] ont montré que si l'aspiration des fumées est effectuée de manière concentrée (plusieurs bouches d'extraction au-dessus de l'incendie sont totalement ouvertes alors que les autres sont entièrement fermées), la dispersion des fumées sera réduite au minimum.

III.4.2 Essais utilisant le gasole comme combustible (Memorial Tunnel)

De 1993 à 1995, des essais intensifs ont été pratiqués dans un tunnel routier désaffecté à deux voies (Memorial Tunnel) en Virginie occidentale (Etats-Unis). Contrairement aux tunnels du Zwenberg et de l'Ofenegg, la section transversale de ce tunnel est bien représentative des tunnels routiers traditionnels (environ 60,5 m² sans faux-plafond). Le gasole a été utilisé comme combustible. La masse volumique du gasole se situe entre 815 kg/m³ et 855 kg/m³ (à 15 °C) et sa capacité calorifique inférieure est de 42,5 MJ/kg. Le gasole est principalement constitué de 86 % de carbone et de 14 % d'hydrogène. La consommation stœchiométrique d'air est de 14,5 kg d'air par kg de gasole. Hormis le fait que la facilité d'inflammation du gasole est moins bonne que celle de l'essence, peu de différences apparaissent entre le gasole et l'essence lors d'un incendie, que ce soit en termes de production ou de dispersion de la fumée.

Durant le programme du Memorial tunnel, un certain nombre d'essais avec différentes productions thermiques de 10 MW, 20 MW, 50 MW et 100 MW, ont été réalisés dans un tunnel de 853 m de long, d'une pente de 3,2 %. Les systèmes suivants de ventilation ont été soigneusement examinés :

- ventilation naturelle,
- ventilation longitudinale par accélérateurs,
- ventilation transversale pure,
- ventilation transversale partielle avec extraction seule,
- ventilation transversale partielle avec injection d'air seule,
- ventilation transversale partielle en deux cantons,
- ventilation transversale partielle avec un seul point d'extraction,
- ventilation transversale partielle avec des bouches d'extraction surdimensionnées.

Il n'est pas possible de relater en détails tous les résultats des essais ; ce qui suit présente donc uniquement les plus importants. Pour les détails, voir [22].

When using reversible semi-transverse ventilation or transverse ventilation, the ventilation system should be switched from normal operation to fire operation as soon as possible (max. exhaust air, 0% - 25% fresh air within the fire section; see V.5.4).

In both cases of a transverse ventilation and a reversible semi-transverse ventilation, the temperature reduction in the traffic space was much higher. This is because with increasing distance from the fire site, more and more exhaust fumes are sucked into the exhaust channel, thus clearing the traffic space of smoke.

Calculation results [57] have shown that a concentrated flue gas withdrawal (several exhaust louvers above the fire are fully opened, while all others are fully closed) provides minimum dispersion of flue gases.

III.4.2 Fire tests using diesel oil as a fire source (Memorial Tunnel fire tests)

In the years 1993 to 1995, intensive fire tests were performed in an abandoned two-lane road tunnel (Memorial Tunnel) in West Virginia (USA). In contrast with the Zwenberg tunnel and the Ofenegg tunnel, the cross-section in this tunnel was representative of usual road tunnels (approx. 60.5 m² without intermediate ceiling). Diesel oil was used as a fire source. The density of diesel oil is between 815 kg/m³ and 855 kg/m³ (at 15 °C), and the lower calorific value is 42.5 MJ/kg. In terms of weight percentage, diesel oil mainly consists of carbon (86%) and hydrogen (14%). The stoichiometric air consumption is 14.5 kg of air per kilogram of diesel oil. Except for the fact that diesel oil ignition qualities are not as good as those of petrol, there are no major differences between diesel oil and petrol in the case of a fire both in terms of smoke development and in terms of smoke dispersal.

During the Memorial Tunnel fire test programme, a number of tests with different fire loads of 10 MW, 20 MW, 50 MW and 100 MW were performed in a 853 m long tunnel with a slope of 3.2%. The following ventilation systems were closely examined:

- natural ventilation,
- longitudinal ventilation with jet fans,
- full transverse ventilation,
- partial transverse exhaust ventilation,
- partial transverse supply ventilation,
- two-zone partial transverse ventilation,
- partial transverse ventilation with single point extraction,
- partial transverse ventilation with oversized exhaust ports.

It is not possible to discuss all the test results in detail, so the following contains the most important results only. For detailed results see [22].

1. Sans ventilation mécanique, la fumée se propage par ventilation naturelle (effet de cheminée) à raison de 2,2 m/s (20 MW) ou 3,4 m/s (50 MW). Après 5 mn (20 MW) ou 3 mn (50 MW), la totalité de la section transversale de l'espace de circulation est remplie de fumée.
2. Des vitesses de l'air de 2,5 (10 MW) à 2,95 m/s (100 MW) furent suffisantes pour empêcher la remontée de fumée en plafond. Les effets thermiques des incendies ont considérablement réduit les débits d'air à l'intérieur du tunnel comparativement à une situation normale (facteurs de réduction : 10 % (10 MW) à 50 % - 60 % (100 MW)).
3. La ventilation transversale pure (air frais = air extrait) fut inefficace pour maîtriser les températures et la fumée pour des incendies de 20 MW ou plus.
4. La ventilation transversale partielle avec soufflage, mais sans extraction d'air, ne permet pas une maîtrise efficace des températures et de la fumée. La ventilation transversale partielle en deux cantons fut capable de contenir la fumée et la chaleur dans des couches bien stratifiées et à proximité de l'incendie.
5. La ventilation transversale partielle avec un seul point d'extraction et la ventilation transversale partielle avec des bouches d'extraction surdimensionnées sont comparables quant à l'extraction des fumées et se sont avérées très efficaces.

III.4.3 Essais avec des voitures et camions réels (projet EUREKA n° 499 – FIRETUN)

Lors de ces essais réalisés en Norvège, une attention spéciale a été portée à la production et à la dispersion des fumées provenant d'incendie de véhicules (voitures et camions). La charge calorifique était comprise entre 5 000 MJ (voitures) et 90 000 MJ (poids lourds) (voir chapitre II et [20]). Un des essais fut réalisé avec de l'heptane C_7H_{16} (84 % C et 16 % H). La masse volumique de l'heptane est d'environ 680 kg/m³ (à 15 °C) et sa capacité calorifique d'environ 44,4 MJ/kg. Ainsi ce carburant est très proche de l'essence et du gasole. La valeur moyenne de la section transversale du tunnel était d'approximativement 30 m² à 35 m². En comparaison avec les essais réalisés avec de l'essence, du gasole et de l'heptane, il faut tout particulièrement tenir compte de deux facteurs qui influencent considérablement la production et la dispersion des fumées lors d'incendies impliquant des véhicules réels :

- les matériaux utilisés pour la construction du véhicule (sans chargement) ralentissent la propagation des flammes et sont difficilement combustibles ;
- les températures initiales aux parois du tunnel étaient relativement basses ; de plus, les parois étaient grossièrement excavées et très rugueuses, aussi le flux de chaleur se propageait-il rapidement vers le rocher.

1. With no mechanical ventilation, the smoke spreads due to the natural ventilation (chimney effect) with 2.2 m/s (20 MW) or 3.4 m/s (50 MW), respectively. After 5 minutes (20 MW) or 3 minutes (50 MW), the whole cross-section of the traffic space is completely filled with smoke.
2. Air velocities of 2.5 (10 MW) to 2.95 m/s (100 MW) were sufficient to prevent backlayering. The thermal effects of the fires significantly reduced tunnel air flows compared to non-fire situation (reduction factors: 10% (10 MW) to 50% - 60% (100 MW)).
3. Full transverse ventilation (fresh air = exhaust air) was ineffective in management of smoke and temperatures for fire sizes of 20 MW or higher.
4. Partial transverse supply ventilation with no exhaust air did not provide effective temperature and smoke management. Two-zone partial transverse ventilation was capable of maintaining smoke and heat in well-stratified layers and in close proximity to the fire.
5. Partial transverse ventilation with single extraction and partial transverse ventilation with oversized exhaust ports are similar to concentrated smoke withdrawal and were very effective.

III.4.3 Fire tests with real cars and trucks (EUREKA project n° 499 - FIRETUN)

In these tests performed in Norway, special attention was paid to the smoke development and the smoke dispersal resulting from the combustion of vehicles (cars and trucks). The fire load was between 5000 MJ (cars) and 90000 MJ (heavy goods vehicles) (see section II and [20]). One fire test was performed with n-heptane C_7H_{16} (84% C and 16% H). The density of n-heptane is about 680 kg/m³ (at 15 °C), the calorific value is approx. 44.4 MJ/kg. So this fuel is very similar to gasoline or diesel oil. The mean value of the tunnel cross section was approx. 30 m² - 35 m². As compared to fire tests performed with gasoline, diesel oil and n-heptane, special attention must be paid to two factors which heavily influence the smoke development and the dispersal of smoke in fires involving real road vehicles:

- the materials used for the vehicle construction (without load) are flame-retardant and hardly combustible;
- the natural initial temperatures at the tunnel wall in the test tunnel were relatively low; in addition, the tunnel wall was roughly excavated and very rough, so that the heat released was rapidly conveyed to the rock.

Ces deux facteurs ralentissent la production de chaleur et donc le développement des fumées, et ils réduisent les températures par rapport aux incendies ayant du carburant comme source. Par ailleurs, ces incendies durent plus longtemps que ceux provoqués par du carburant. De plus, les températures des fumées baissent rapidement à mesure qu'elles s'éloignent du foyer, de telle manière que les fumées retombent rapidement au sol. La section transversale du tunnel fut remplie de fumée. A l'opposé d'autres essais, où il y a normalement une zone libre de fumée au-dessus du sol (au moins pendant un certain temps), cette zone n'existait pratiquement pas (sauf dans le cas d'un incendie impliquant du bois). Ainsi, les conditions de cet essai furent sensiblement plus mauvaises que dans le cas d'essais utilisant du carburant.