

Dans les tunnels courts, les entrées constituent des issues suffisantes. Dans les tunnels longs, la longueur du chemin de fuite dépend du type de circulation et des possibilités qu'offre le système de ventilation. Mieux la ventilation permet de réduire la zone où les chances de survie et les conditions de visibilité sont limitées, plus le trajet que devra parcourir un usager pour s'évacuer (c'est-à-dire l'inter-distance entre les issues de secours) pourra être long.

Dans les tunnels très longs, où il est impossible de réduire la longueur de la zone de danger par des mesures d'exploitation, les issues de secours et les itinéraires d'évacuation devront être étudiés très sérieusement. Les possibilités suivantes existent :

- galeries transversales conduisant à l'air libre ou dans d'autres tubes pour piétons et/ou véhicules,
- liaisons transversales vers une galerie de sécurité pour piétons,
- abris spécialement équipés,
- zones de demi-tour pour véhicules en tunnel.

Des recommandations sur la distance entre les issues de secours n'étaient pas données.

### **Montréal 1995**

Pour le Congrès mondial de la route de Montréal (1995), les groupes de travail 1 et 6 avaient préparé un document intitulé « Etat-de-l'art : recommandations et expériences existantes » sur les équipements de sécurité en tunnel dans 13 pays, y compris les issues de secours.

## **5.3 Dimensionnement de l'itinéraire d'évacuation**

Lors du dimensionnement des itinéraires d'évacuation, il faut prendre en compte plusieurs facteurs qui influent sur les chances de s'échapper, en particulier :

- le type de confinement,
- l'incendie et la fumée auxquels il faut s'attendre,
- le comportement humain,
- la ventilation,
- la pente de la chaussée (déclivité),
- les contrôles effectués dans le tunnel.

La densité du trafic n'est pas prise en compte comme un facteur pour le dimensionnement des itinéraires d'évacuation, à moins qu'elle soit très faible, le nombre maximal d'usagers du tunnel impliqués dans un incident étant déterminé par la longueur de ce tunnel (c'est-à-dire le nombre de voitures arrêtées en arrière de l'incendie) et non par le nombre de voitures passant par unité de temps. En outre, une analyse des risques peut généralement mener à la conclusion que des itinéraires d'évacuation ne sont pas nécessaires dans des tunnels ayant une densité de circulation très faible. Dans de tels cas, il convient d'examiner si le fait que seul un petit nombre de personnes sont impliquées dans un accident grave et la probabilité réduite d'un accident ne peuvent pas justifier l'absence de itinéraires d'évacuation.

In short tunnels the portals are adequate. In longer tunnels, the length of the escape route depends on the type of traffic and the ventilation system. The more the limited survival zone and the bad visibility conditions can be diminished by the ventilation system, the longer the escape distance for tunnel users (i.e., interval between emergency routes) may be.

In very long tunnels, where it is impossible to limit the danger zone by operational measures, emergency exits or escape routes must be seriously examined. The following possibilities are presented:

- cross connections to open air or other tubes for pedestrians and/or vehicles;
- cross connections into safety tunnels for pedestrians;
- specially-equipped safety rooms;
- turning bays for vehicles.

General recommendations for the distance between escape exits were not given.

### **Montreal 1995**

For the World Congress in Montreal, Working Groups 1 and 6 prepared a paper on “State of the Art: Existing Guidelines and Experiences” on safety equipment in tunnels within 13 countries, including emergency exits.

## **5.3 Escape Route Design**

In planning and designing escape routes one should consider several factors that influence the chance for escaping, including:

- the type of enclosure;
- the fire and smoke expected;
- human behaviour;
- ventilation;
- slope of the road surface (grade);
- tunnel controls.

Traffic density is not taken into account as a factor to size the escape routes because unless it is very low, the maximum number of road tunnel users involved in an incident is determined by the length of the tunnel (i.e., the number of cars stopped behind the fire) and not by the number of cars passing per time increment. A typical risk analysis may conclude that escape routes are not required for tunnels with very low traffic densities. In such a case, it must be assessed whether the possibility of only a few people being involved in a serious accident and the reduced probability of an accident can justify the lack of escape routes.

### 5.3.1 Types de confinement

Un ouvrage routier peut être confiné de la façon suivante :

- seuls les côtés sont fermés (route en tranchée),
- les côtés sont fermés et le plafond partiellement fermé (tunnel avec ouvertures en plafond),
- côtés partiellement fermés et plafond entièrement fermé,
- côtés et plafond entièrement fermés (tunnel).

Quel que soit le type d'ouvrage, on suppose que, en l'absence de dispositions particulières, l'usager n'a normalement aucune possibilité de quitter directement la chaussée. Plus un ouvrage est confiné, plus les effets d'un incendie se font sentir dans l'ouvrage. Comme la fumée a tendance à monter au cours d'un incendie, elle peut s'échapper par des ouvertures en plafond. Plus les dimensions de ces ouvertures sont importantes, moins la fumée s'accumulera et se répandra longitudinalement le long du tunnel. Cela est également vrai pour des ouvertures dans les parois latérales, en fonction de leurs dimensions et de leur implantation (en hauteur). Des dispositions permettant l'extraction des fumées aident naturellement à limiter la longueur d'ouvrage enfumée. D'une façon générale, plus un ouvrage routier est confiné, plus il est besoin d'avoir des moyens d'évacuation adéquats. Cela est montré par la Figure 5.1.

Des gaz et des vapeurs toxiques peuvent être dégagés au cours de certains accidents, par exemple lorsqu'un camion-citerne est endommagé. Comme la densité d'un gaz ou d'une vapeur est normalement plus élevée que celle de l'air, ce gaz ou cette vapeur s'étendra au-dessus de la surface de la chaussée, que l'ouvrage soit couvert ou non. L'importance du confinement a donc moins d'importance en cas de dégagement de gaz ou de vapeur toxique que dans un cas d'incendie et de fumée, sauf si des ouvertures latérales aident à diluer la concentration des gaz en présence de conditions de vent favorables. Dans les tunnels avec des pentes longitudinales importantes, comme les tunnels immergés, les gaz toxiques peuvent être à l'origine de graves problèmes.

### 5.3.2 Puissance et développement de l'incendie

Les points importants pour le dimensionnement des installations d'évacuation sont la puissance, le développement et la durée des incendies potentiels. La puissance de l'incendie est liée à la quantité et à la température des fumées. Le développement de l'incendie affecte largement les possibilités d'auto-évacuation, laquelle doit pouvoir se faire dès le début de l'incendie. La durée de l'incendie est une valeur extrêmement importante si des abris sont utilisés.

### 5.3.1 Types of Enclosures

A road structure can be enclosed as follows:

- only sides closed (i.e. a depressed roadway);
- sides closed and ceiling partly closed (i.e. a tunnel with gaps in the roof);
- sides partially closed and ceiling fully closed;
- sides and ceiling completely closed (i.e. a tunnel).

With all structure types, it is assumed that without special provisions, there is typically no chance for a road user to depart directly from the roadway. The more enclosed a structure, the greater the effects of a fire inside the structure. Since smoke rises during a fire, it can escape through gaps in the ceiling. The larger the gaps, the slower the smoke will accumulate and spread longitudinally along the tunnel. Depending on size and position (height), this will hold true for gaps in sidewalls, too. Of course, provisions for smoke extraction will help to limit the length of roadway being filled with smoke. In general, the more a road structure is enclosed, the greater the need for adequate escape provisions. This is demonstrated in Figure 5.1.

Toxic gases and vapours can be released during certain accidents, such as when a tanker is damaged. Since the specific gravity of a gas or vapour is typically higher than that of air, it will spread over the road surface whether or not the structure has a roof. The extent of enclosure is therefore less significant for toxic gas and vapour release than for a fire and smoke situation, with the exception that side openings can help to dilute the gas concentration if wind patterns are favourable. In tunnels with significant longitudinal slopes, like underwater tunnels, toxic gases can cause severe problems.

### 5.3.2 Fire Size and Development

Important issues for designing escape provisions are the size, development and duration of potential fires. The fire size is related to the amount and temperature of smoke. The development of the fire will greatly affect the chances for self-evacuation, which must take place in the early phases of a fire. The duration of the fire is extremely important if shelters are utilized.

## Puissance de l'incendie

On trouve dans la littérature existante de nombreuses valeurs pour la puissance potentielle de l'incendie. Le document AIPCR « Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers » [2] donne les valeurs suivantes :

- 1 petite voiture de tourisme 2,5 MW
- 1 grande voiture de tourisme 5 MW
- 2 – 3 voitures de tourisme 8 MW
- 1 camionnette 15 MW
- 1 bus 10 MW
- 1 camion avec des marchandises combustibles (cas général) 20-30 MW
- 1 citerne d'essence 30-250 MW  
selon le système de recueil des liquides

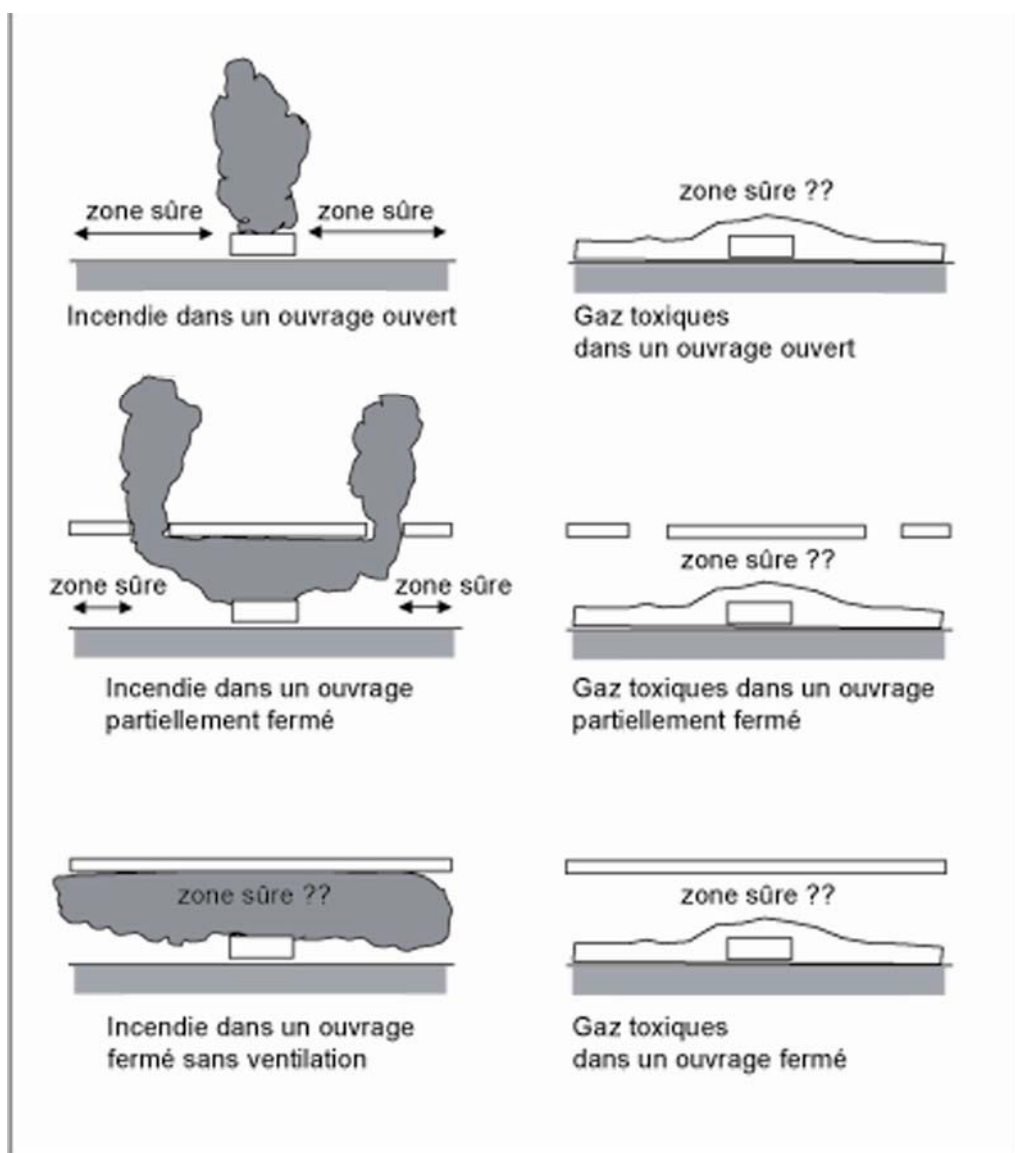


Figure 5.1 - Incendies dans différents types d'ouvrage

## Fire Size

Many potential values for fire size can be found in existing literature. The PIARC document “Fire and Smoke Control in Road Tunnels” [2] shows the following values:

- 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 10 MW
- 1 lorry with burning goods (general case) 20-30 MW
- petrol tanker depending on drainage 30-250 MW

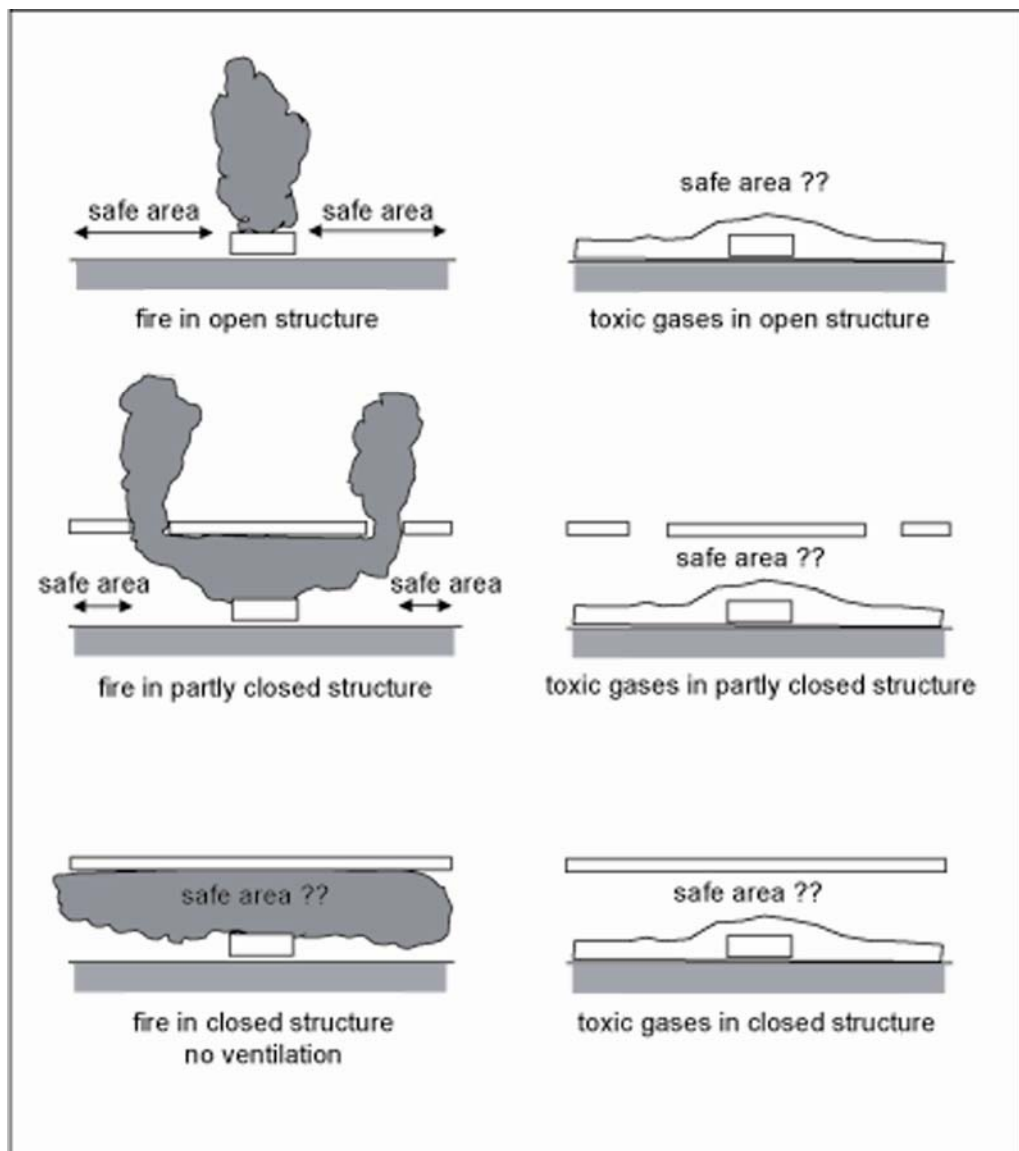


Figure 5.1 - Fires in various structure types

La littérature en provenance des Pays-Bas donne les puissances maximales d'incendie suivantes :

- voiture 5-6 MW [22]
- bus 20-30 MW [23]
- petit camion avec chargement 30-50 MW
- grand camion avec chargement 50-150 MW [23]
- camion-citerne 200-300 MW [23]

Comme un trafic habituel se compose principalement de voitures de tourisme, c'est la probabilité d'un incendie d'un véhicule de ce type qui est la plus grande. On estime que 95 % de l'ensemble des incendies de voitures sont dus à une panne plutôt qu'à un accident. Par conséquent, dans la majorité des incidents, une seule voiture se trouve impliquée dans l'incendie. Normalement, un incendie de voiture n'a pas une très grande ampleur, mais il peut produire une forte quantité de fumée. Bien que sa température ne soit pas très élevée, cette fumée peut être suffisamment toxique pour blesser des personnes. Des incendies très importants, qui produisent une grande quantité de chaleur et de fumées toxiques, peuvent se produire lorsque des poids lourds sont impliqués. Une étude menée dans le tunnel sous l'Elbe en Allemagne de 1979 à 1985 a montré que, alors que les camions ne constituent que 15 % de l'ensemble du trafic, ils sont à l'origine de 30 % des incendies. Dans cette étude, la presque totalité des incendies étaient liés à une panne de véhicule.

Si l'incendie a pour cause un accident, il arrive souvent qu'il implique plus d'un véhicule. Dans de tels cas, la puissance de l'incendie est souvent plus importante et dépend des véhicules impliqués dans l'accident.

Cela ne signifie pas que l'incendie n'est jamais important dans le cas d'une auto-inflammation de véhicule, ni inversement qu'il n'est jamais bénin dans le cas d'un accident. L'incendie causé par l'auto-inflammation d'un véhicule dans le tunnel du Mont Blanc a été extrêmement important. Les informations qui précèdent n'ont pour but que de donner une idée de ce à quoi on peut raisonnablement s'attendre.

### ***Développement de l'incendie***

Un incendie de véhicule n'atteint jamais sa taille maximale immédiatement – il demande du temps pour se développer. En fait, pratiquement tous les incendies se développent de façon semblable, quelle que soit leur puissance finale. Une étude comprenant l'incendie de 30 voitures dans un parking fermé [22] et un essai d'incendie dans le tunnel du Bénélux aux Pays-Bas ont donné le scénario type suivant pour un véhicule léger :

- l'incendie reste modéré les 5 à 10 premières minutes après l'inflammation,
- les vitres se brisent, et le feu atteint sa dimension maximale dans les 2 à 5 minutes,

Literature from the Netherlands provides the following maximum fire sizes:

- car 5-6 MW [22]
- bus 20-30 MW [23]
- small loaded lorry 30-50 MW
- large loaded lorry 50-150 MW [23]
- tanker 200-300 MW [23]

Since the typical traffic mix is comprised mostly of cars, the probability of a car fire is the highest. It is estimated that 95% of all car fires are caused by breakdowns rather than accidents. Therefore, in the majority of incidents, only one car is involved in the fire. A car fire is typically not very large, but can still produce a lot of smoke. While not very high in temperature, the smoke can be toxic enough to injure people. Very large fires that produce a lot of heat and toxic smoke can occur when lorries are involved. An investigation of the Elbe Tunnel in Germany from 1979 to 1985 indicated that while lorries comprised only 15% of the total vehicle mix, 30% of all fires were caused by lorries. Almost all of the fires in this investigation were related to a vehicle breakdown.

If the cause of the fire is an accident, it often happens that more than one vehicle is involved. In such events, the fire size is likely to be larger and depends on the composition of the vehicles involved in the incident.

This does not mean that the fire size will never be large in the case of a vehicle breakdown, and conversely will never be small in the case of an accident. The fire caused by a vehicle breakdown in the Mont Blanc Tunnel was very large. The above information is only intended to give an idea of what can reasonably be expected.

### ***Fire Development***

A vehicle fire is never immediately at its maximum size -- it takes time for the fire to develop. In fact, almost all fires follow the same fire development pattern, irrespective of the final fire size. An investigation including 30 car fires in a closed parking facility [22] and a fire test in the Netherlands' Beneluxtunnel indicated the following typical scenario for a passenger car:

- the fire remains small in the first 5-10 minutes after ignition;
- the windows break, and the fire reaches its maximum size within 2-5 minutes;

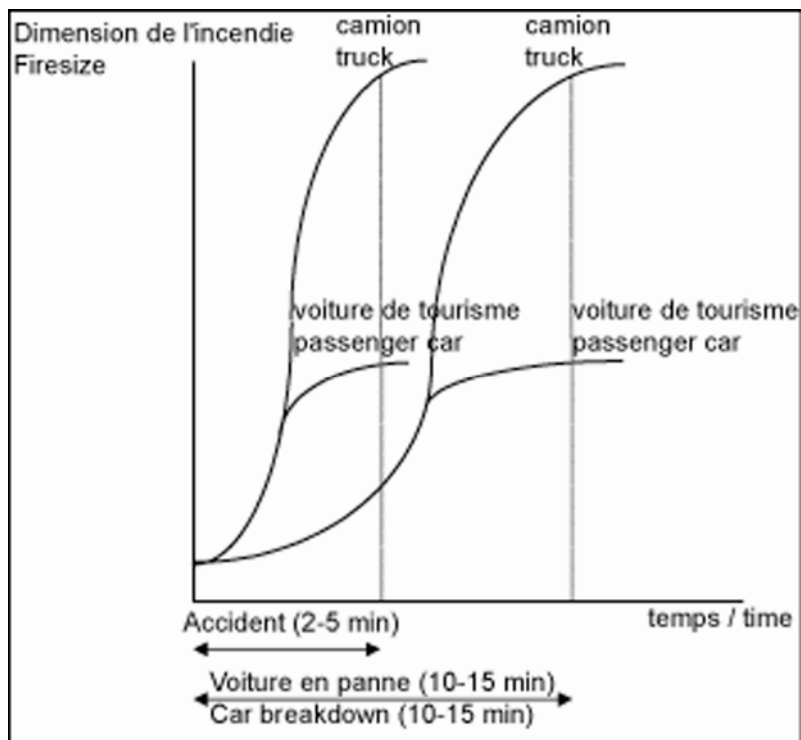


- le feu brûle à sa puissance maximale ou presque pendant 10 à 15 minutes environ,
- le feu s'éteint lentement.

Si l'on prend en compte le fait que l'incendie de voiture le plus courant démarre dans le moteur, et que les compartiments moteurs des voitures sont similaires à ceux des camions et des bus, on peut prévoir le même modèle de développement pour des incendies plus importants. La puissance de l'incendie et sa durée seront bien entendu très différentes.

Dans le cas d'un accident, l'incendie se développe habituellement beaucoup plus rapidement en raison du relâchement d'essence et d'huile et du mélange de ces combustibles avec l'air. Il est difficile de déterminer à quel moment se produit l'inflammation : elle peut se produire très rapidement après l'accident ou seulement après un certain temps. On peut supposer que ces incendies suivent le même modèle de développement que celui décrit ci-dessus, quelles que soient la puissance finale de l'incendie et sa durée.

La figure 5.2 donne le développement type initial d'un incendie.



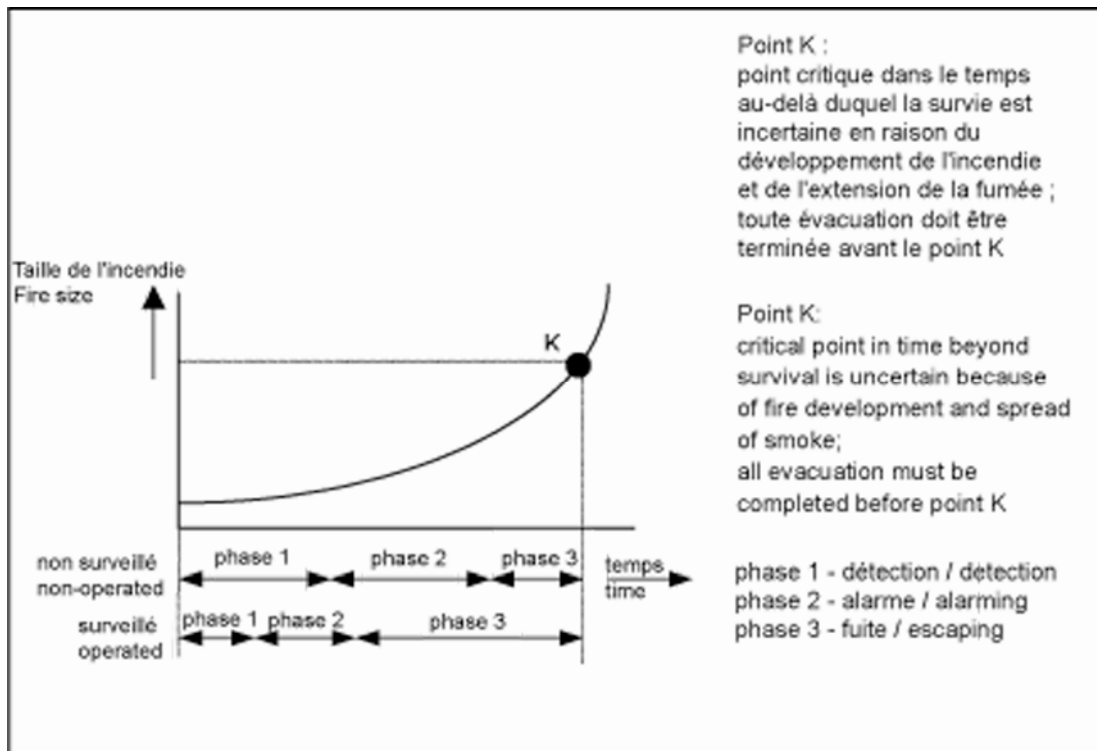
**Figure 5.2 - Développement initial de l'incendie dans le temps**  
Initial fire development over time

- the fire burns at or near its maximum size for about 10-15 minutes;
- the fire slowly extinguishes.

Taking into account that most passenger car fires start in the engine, and that passenger car engine compartments are similar to those of lorries and busses, similar fire development patterns can be expected for larger fires. Fire size and duration will, of course, be very different.

In the case of an accident, the fire will typically develop much faster due to the release of gas and oil and the mixing of these combustibles with air. The time for ignition is difficult to establish: it can occur very quickly after the accident or some time later. It can be assumed that these fires will follow similar initial development patterns as described above, regardless of final fire size and duration.

Typical initial fire development is shown in Figure 5.2.



**Figure 5.3 - Phases du comportement humain et du développement de l'incendie / Phases in human behaviour and fire development**

### 5.3.3 Comportement humain

Un facteur important pour concevoir les dispositions d'évacuation est le comportement humain. Un rapport sur le comportement humain dans des situations dangereuses [24 ; 25] indique que les réactions les plus courantes vis-à-vis d'un incendie sont l'incrédulité, la sous-estimation et/ou le refus d'un danger potentiel. Ces sentiments se trouvent renforcés lors de la première phase d'un incendie s'il est faible et sans beaucoup de fumée. Le rapport conclut qu'environ 37 % des personnes présentes essaient d'éteindre le feu, 24 % avertissent les autres usagers, et seulement 16 % tentent de s'échapper. Une grande partie des personnes qui restent sur place se contentent de regarder l'incendie, certaines à courte distance.

D'autres personnes encore sont inconscientes de la gravité de la situation parce qu'elles se trouvent à une certaine distance de l'accident, attendant dans leurs voitures de pouvoir continuer. Elles peuvent être alertées par quelque signal d'urgence ou bien lorsqu'elles se trouvent recouvertes par la fumée, ce qui peut se révéler trop tard dans les deux cas. Lorsqu'un petit incendie prend soudainement de l'ampleur, de nombreuses personnes se trouvent mises en danger par les fumées et les gaz chauds.

Le comportement humain est tel que les gens essaient de faire, aussi longtemps qu'ils le peuvent, ce qu'ils avaient l'intention de faire ou ce qu'ils étaient en train de faire avant de se trouver impliqués dans une situation différente. En d'autres termes, il est difficile de modifier leur état d'esprit, d'une situation normale à une situation requérant un comportement inhabituel. Ce processus peut être divisé en trois phases (voir Figure 5.3) :

- Phase de détection : temps nécessaire pour devenir conscient d'un événement inhabituel. Dans le cas d'un incendie, c'est le temps qui s'écoule entre le déclenchement de l'incendie et celui où il est remarqué.
- Phase d'alerte : temps nécessaire pour évaluer quelle est la réaction la mieux appropriée.
- Phase d'action : temps pendant lequel l'action est entreprise.

Les commentaires suivants peuvent être formulés au sujet de ces trois phases :

- La durée de la phase de détection peut varier de façon significative selon les usagers de la route et dépend largement de la distance entre le foyer de l'incendie et l'observateur. Les niveaux d'éclairage dans les tunnels routiers sont normalement peu élevés et la visibilité est limitée par les piédroits et le plafond, de sorte que la fumée ne peut pas se voir facilement de loin.

### 5.3.3 Human Behaviour

An important factor in designing escape provisions is human behaviour. A report on human behaviour in dangerous situations [24; 25] indicates that the most common reactions to fire are disbelief, underestimation and/or denial of potential danger. These feelings are strengthened in the first phase of a fire when it is small and without much smoke. The report concludes that about 37% of the people present will try to extinguish the fire, 24% will warn other people, and only 16% will try to escape. Many people will just watch the fire, from a short distance.

Other people will be unaware of the severity of the situation because they are at some distance from the accident location, waiting in their cars until they can drive on. They may be alerted by some kind of emergency call or when they are covered by smoke, both of which may be too late. When a small fire suddenly grows larger, many people are in danger because of the smoke and heated gases.

Human behaviour is such that people try to do, as long as they can, what they planned to do or what they were doing before they were involved in a different situation. In other words, it is difficult to change their minds from a normal situation to a situation requiring unusual behaviour. The process can be divided into three phases (see Figure 5.3):

- detection phase: the time needed to become aware of an unusual event. In the case of fire, this is the time from the fire breaking out to it being noticed;
- alarm phase: the time needed to assess the most appropriate response;
- action phase: the time in which action is taken.

With regard to these three phases, the following comments are made:

- the duration of the detection phase can vary significantly among different road users, and greatly depends on the distance between the fire and the observer. Lighting levels in tunnels are typically low, and visibility is limited by the sidewalls and ceiling, so that smoke cannot be easily seen from a distance;

- La décision prise pendant la phase d'alerte détermine le comportement et les actions de la phase suivante. En raison du stress dû à la situation, il est difficile de modifier ces décisions par des influences externes. Cela signifie qu'un concepteur de tunnel doit fournir autant d'informations que possible pour aider les gens à prendre les bonnes décisions. Ces informations doivent aussi être plus évidentes (frappantes) que les autres informations visuelles ou auditives.
- La phase d'action inclut aussi bien le temps nécessaire pour s'échapper que celui nécessaire pour entreprendre d'autres actions.

Le temps total d'évacuation est la somme des durées des trois phases. Le temps d'évacuation disponible dépend de la vitesse à laquelle l'incendie se développe et de la propagation de la fumée dans cette situation particulière.

Pour calculer le temps d'évacuation, il faut connaître ou estimer au mieux la durée des deux premières phases. Il existe peu de littérature disponible sur ces trois phases car, pour autant que l'on sache, ce sujet a fait l'objet de peu de recherches. A partir de l'expérience et de quelques exercices d'évacuation, il est possible de conclure que, sans alerte ou instructions extérieures, les usagers ont besoin de 5 à 15 minutes pour décider qu'ils doivent faire quelque chose. Si l'on se base sur les durées normales de développement de l'incendie mentionnées précédemment, cela laisse aux usagers très peu de temps pour s'échapper, puisqu'ils ont utilisé la plus grande partie du temps disponible pour prendre une décision. Cette situation est illustrée par la figure 5.3.

Le « retournement mental » doit donc se faire aussi rapidement que possible, pour que la phase d'évacuation soit aussi longue que possible. Une détection rapide de l'incendie et des instructions appropriées données aux usagers du tunnel peuvent raccourcir les deux premières phases, laissant ainsi plus de temps pour l'évacuation effective dans la troisième phase.

#### 5.3.4 Ventilation

Un objectif important du système de ventilation pendant un incendie est d'assurer que les voies d'évacuation restent exemptes de fumée. La publication « Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers » de l'AIPCR, 1999 [2] donne des recommandations pour la ventilation en cas d'incendie. Celles-ci sont complétées par le chapitre 4 du présent rapport.

Les fumées menacent la vie des usagers pour plusieurs raisons. Une étude faite sur des incendies dans des immeubles [26 ; 27] a montré qu'il est impératif que les sorties de secours et les voies d'évacuation restent visibles dans les premiers instants de l'incendie, où doit se réaliser l'auto-évacuation.

- the decision made during the alarm phase determines the behaviour and actions in the next phase. Because of the stress of the situation, it is very difficult to change such decisions by external influences. This means that a tunnel designer should provide as much information as possible to help people make the right decisions. This information should also be more noticeable (striking) than other visual or audible information;
- the action phase includes the time to escape as well as to take other actions.

The total evacuation time is the sum of the durations of the three phases. The available evacuation time depends on the speed of fire development and the spread of smoke in that particular situation.

In order to calculate the evacuation time, one should know, or make a best guess at, the duration of the first two phases. There is limited literature available on these phases because, as far as is known, limited research has been conducted. From experience and some evacuation exercises, it can be concluded that without external warning or instruction, people need about 5-15 minutes to decide that something has to be done. Based on the typical fire development durations discussed above, this leaves people very little time to actually escape, as they have used much of their available time waiting to make a decision. This relationship is shown in Figure 5.3.

“Mental turnaround” must therefore take place as quickly as possible for the effective evacuation phase to be as long as possible. Quick fire detection and appropriate instructions to tunnel users will shorten the first two phases, leaving more time for real escape in the third phase.

#### 5.3.4 Ventilation

An important goal of the ventilation system during a fire is to provide smoke-free escape routes. The publication “Fire and Smoke Control in Road Tunnels” by PIARC, 1999 [2], provides recommendations for ventilation in case of a fire. These are complemented by section 4 of the present report.

Smoke is life threatening to road users for several reasons. An investigation of building fires [26; 27] showed that the visibility of emergency exits and escape routes is imperative in the early stages of a fire, when self-evacuation should take place.

La ventilation – qu'elle soit naturelle ou mécanique – peut aider à éviter que les espaces occupés se remplissent de fumées, maintenir les concentrations en CO à des valeurs faibles en fournissant de l'air frais et maintenir des niveaux de visibilité suffisants pour les panneaux signalant les voies d'évacuation.

Les tunnels de moins de 300 m ne sont presque jamais équipés d'une ventilation mécanique. Les mouvements de fumée sont plus difficiles à prévoir s'il n'existe aucune ventilation mécanique. Les fumées se déplacent librement et ne subissent que l'influence des mouvements naturels de l'air et les effets de flottabilité. Comme le montre la figure 5.4, en l'absence de ventilation mécanique, l'espace réservé au trafic sur un seul côté ou sur les deux côtés de l'incendie est envahi par la fumée. Si la voie d'évacuation hors du tunnel est trop longue, des issues de secours doivent être prévues.

Comme le montre la figure 5.5, les ouvrages partiellement fermés sont comparables aux tunnels « courts » en ce que les zones proches des ouvertures en toit sont sûres si toute la fumée peut s'échapper par les ouvertures. La zone située entre les ouvertures de toit peut se remplir de fumée. Si cette zone est trop longue, des issues de secours doivent être prévues.

Dans les tunnels longs, il faut faire une distinction entre trafic unidirectionnel et trafic bidirectionnel. Ainsi que le décrit le rapport AIPCR « Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers » [2], la ventilation longitudinale est préférée à la ventilation transversale dans les tunnels unidirectionnels, où dans les tunnels unidirectionnels, les usagers se trouvent toujours en amont de l'incendie. Un système de ventilation longitudinale maintient la zone en amont du foyer libre de fumée, ce qui signifie qu'en théorie des itinéraires d'évacuation ne sont pas nécessaires. Cependant des issues de secours doivent toujours être prévues pour les cas exceptionnels, par exemple celui d'un incendie se développant jusqu'à un point tel que le système de ventilation ne peut plus agir, ou d'une explosion.

En outre, on suppose généralement que le trafic en aval du foyer peut sortir du tunnel à vitesse normale. Mais il ne faut jamais négliger la présence possible d'usagers en aval de l'incendie. Par exemple, dans le cas d'un embouteillage, il peut se produire une collision donnant lieu à un incendie en fin de queue de cet embouteillage, comme le montre la figure 5.7. Dans ce cas, de nombreux usagers en aval seront affectés par la fumée lorsque la ventilation longitudinale sera mise en route. Cependant, si la ventilation longitudinale n'est pas actionnée, ce sont les usagers en amont de l'incendie qui seront affectés. Dans les tunnels avec fort risque de congestion, les distances entre les issues de secours doivent être suffisamment courtes pour que les temps d'évacuation soient rapides. Il est également nécessaire que la détection et l'alerte soient très rapides afin que les usagers disposent du maximum de temps pour aller vers les issues de secours. Dans tous les cas, il convient autant que possible d'éviter des embouteillages en tunnel au moyen de systèmes de gestion de la circulation.

Ventilation – natural or mechanical – can help to prevent occupied areas from filling with smoke, keep CO concentrations low by providing fresh air and maintain sufficient visibility levels for escape route signs.

Tunnels shorter than 300 m are almost never equipped with mechanical ventilation. Smoke movement is more difficult to predict when there is no mechanical ventilation. The smoke can move around freely and is only affected by natural air movement and buoyancy factors. As shown in Figure 5.4, in tunnels with no mechanical ventilation the traffic space on one or both sides of the fire can be affected by the smoke. If the escape route from the traffic space is too long, then emergency exits should be provided.

As shown in Figure 5.5, partly closed structures are somewhat comparable to “short” tunnels in that areas adjacent to roof openings are safe if all the smoke can escape through the openings. The area between the roof openings can become filled with smoke. If this area is too long, then emergency exits should be provided.

In long tunnels, a distinction must be made between unidirectional and bi-directional traffic. As described in the PIARC report “Fire and Smoke Control in Road Tunnels” [2], longitudinal ventilation is favoured over transverse ventilation in unidirectional tunnels, road users are always present upstream of the fire. A longitudinal ventilation system keeps the area upstream of the fire smoke-free, which means that, in theory, there is no need for escape routes. However, emergency exits should always be provided to account for the unexpected, such as the fire developing to a size that the ventilation system can no longer handle, or an explosion occurring.

Additionally, it is usually assumed that traffic downstream of the fire can leave the tunnel at normal driving speeds. However, the possibility of people being present downstream of the fire should never be neglected. For instance, in the case of a traffic jam, a collision causing a fire can happen at the tail end of the jam, as shown in Figure 5.7. In this case many people downstream will be affected by the smoke when the longitudinal ventilation system is activated. However, if the longitudinal ventilation system is not started, the smoke will affect the people upstream of the fire. In tunnels with high risk of congestion, the distances between emergency exits should be short enough to provide quick escape times. Very quick detection and warning is also needed to give road users as much time as possible to walk to the emergency exits. In any case, traffic jams in tunnels should be avoided as much as possible by traffic management systems.



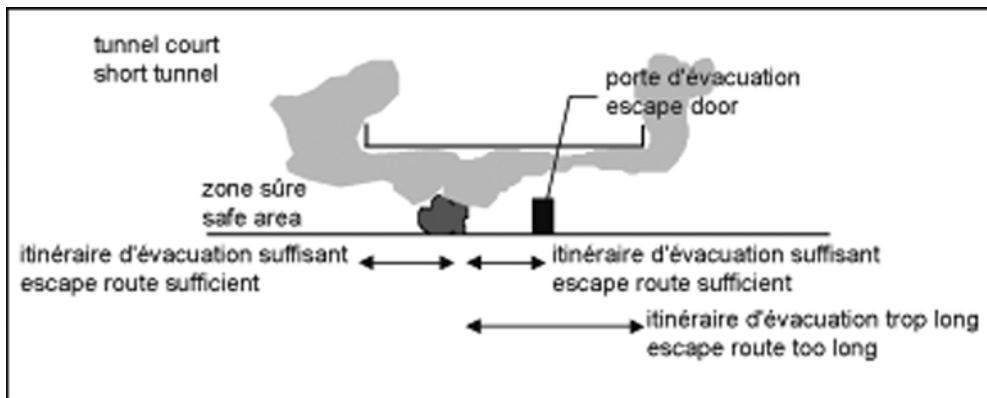


Figure 5.4 - Comportement de la fumée dans un tunnel court sans ventilation mécanique  
Smoke behaviour in a tunnel without mechanical ventilation

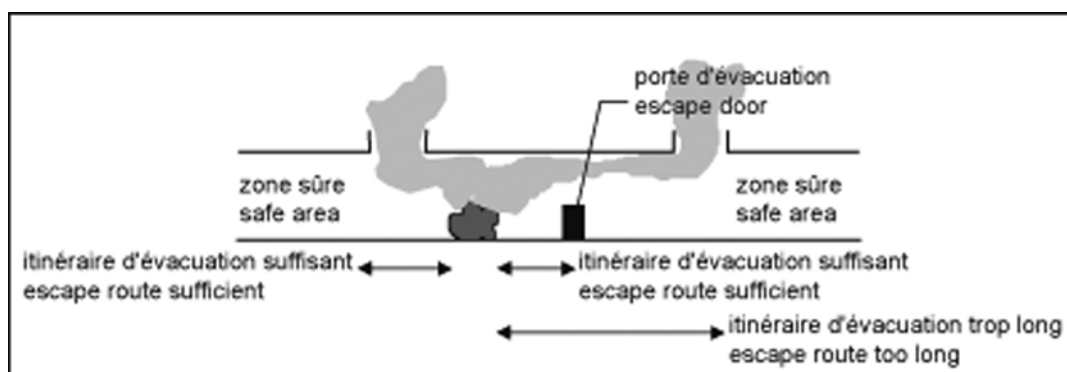


Figure 5.5 - Comportement de la fumée dans un tunnel avec ouvertures en toit  
Smoke behaviour in a tunnel with roof openings

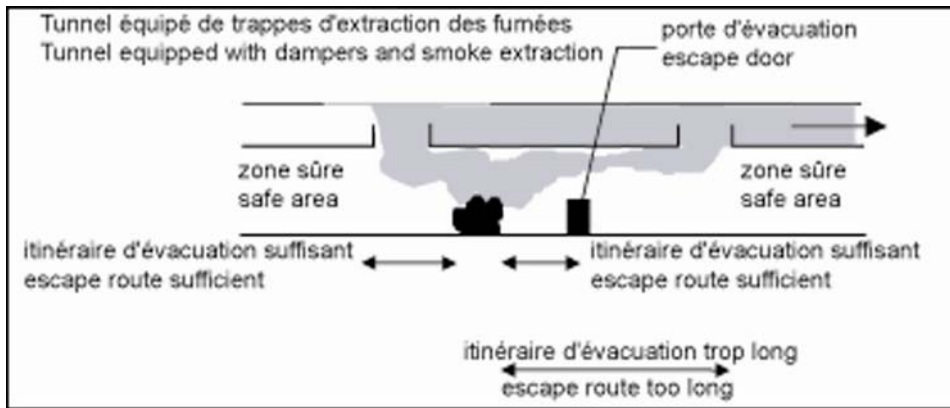


Figure 5.6 - Comportement de la fumée dans un tunnel avec extraction des fumées  
Smoke behaviour in a tunnel with smoke extraction

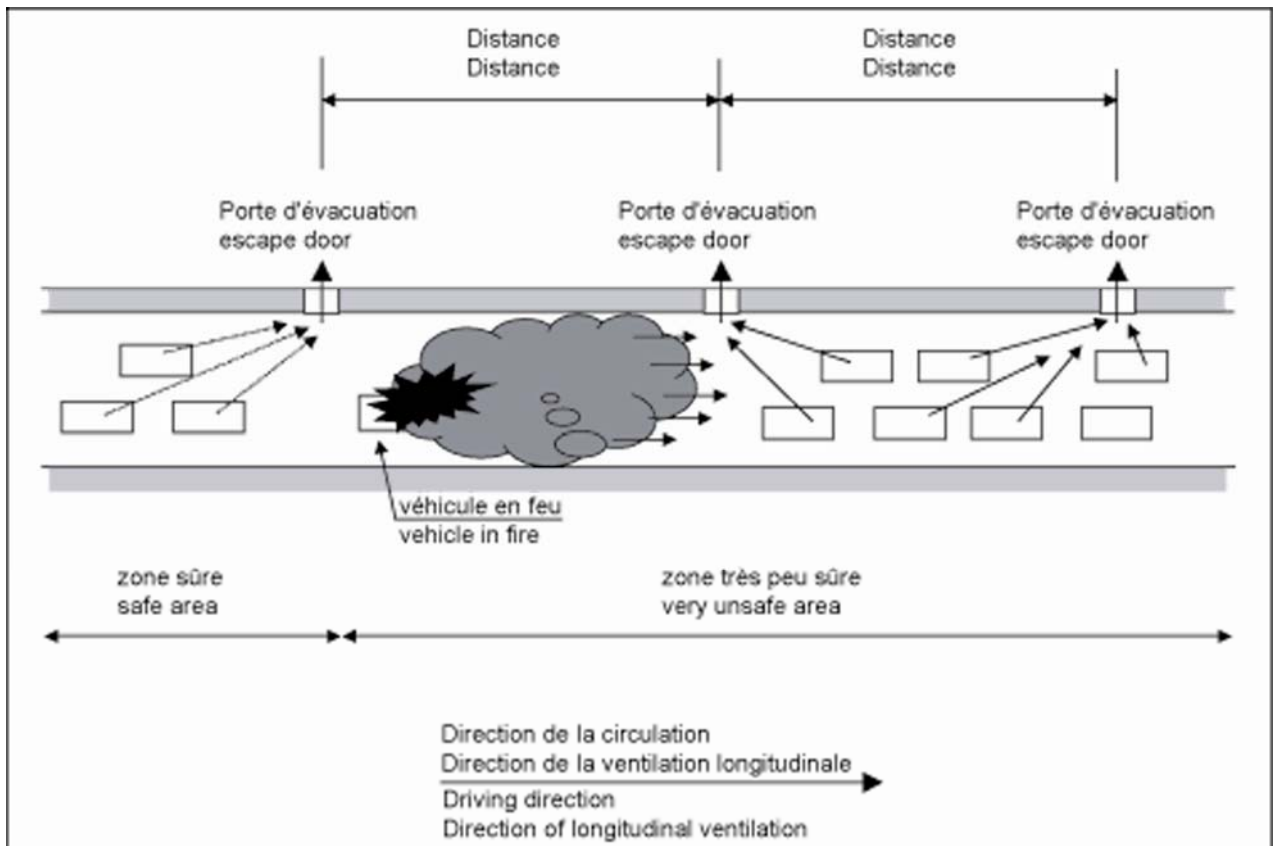


Figure 5.7 - Trafic unidirectionnel congestionné et ventilation longitudinale /  
Congested unidirectional traffic and longitudinal ventilation

La ventilation longitudinale n'est pas le système préféré pour les tunnels bidirectionnels, car des personnes se trouvent piégées sur les deux côtés du foyer, et la ventilation longitudinale aggrave les conditions dans une direction. Dans ce cas, une ventilation transversale comprenant un contrôle du courant d'air longitudinal peut offrir une bonne solution (voir figure 5.8). Il est important de noter que de tels systèmes sont limités à une certaine puissance d'incendie (souvent 30 MW) par la capacité d'extraction. Si le débit de fumée produit dépasse cette capacité, les usagers peuvent être affectés défavorablement. Cela rend les issues de secours particulièrement utiles avec de tels systèmes : si les personnes sont prévenues à temps et de façon efficace et si elles réagissent rapidement, elles devraient pouvoir s'échapper avant que l'incendie n'atteigne une puissance que le système de ventilation ne peut pas gérer.

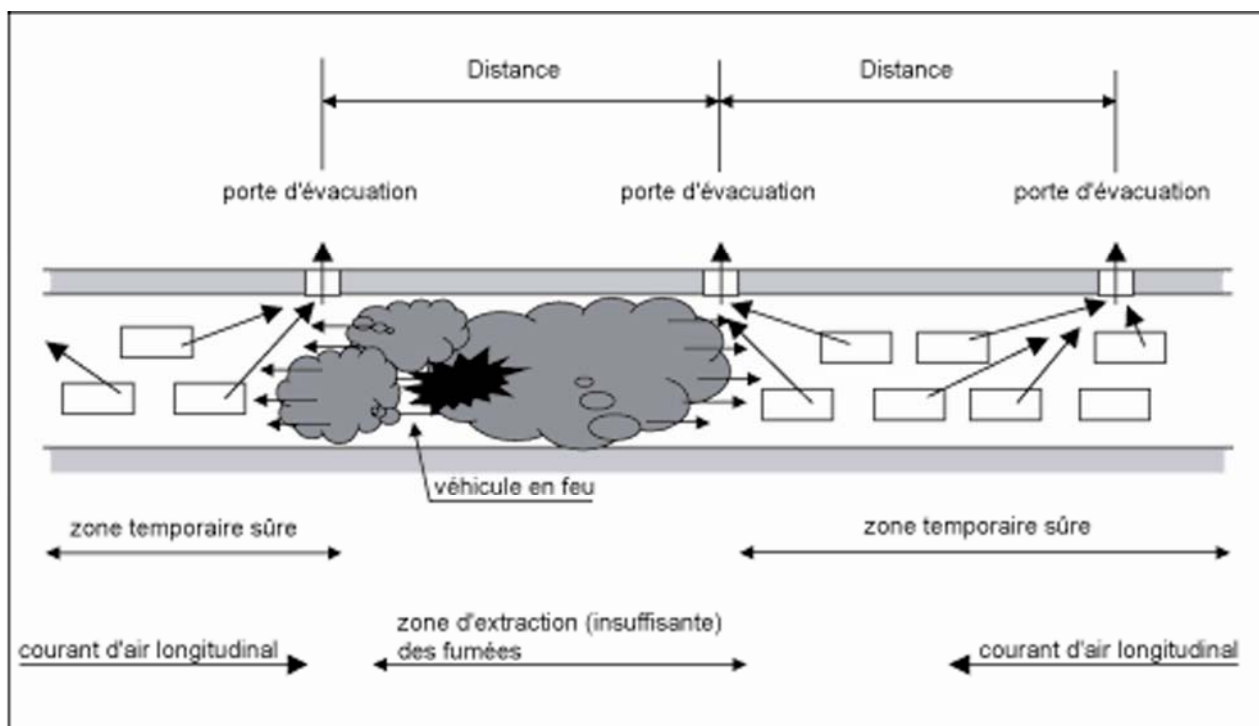


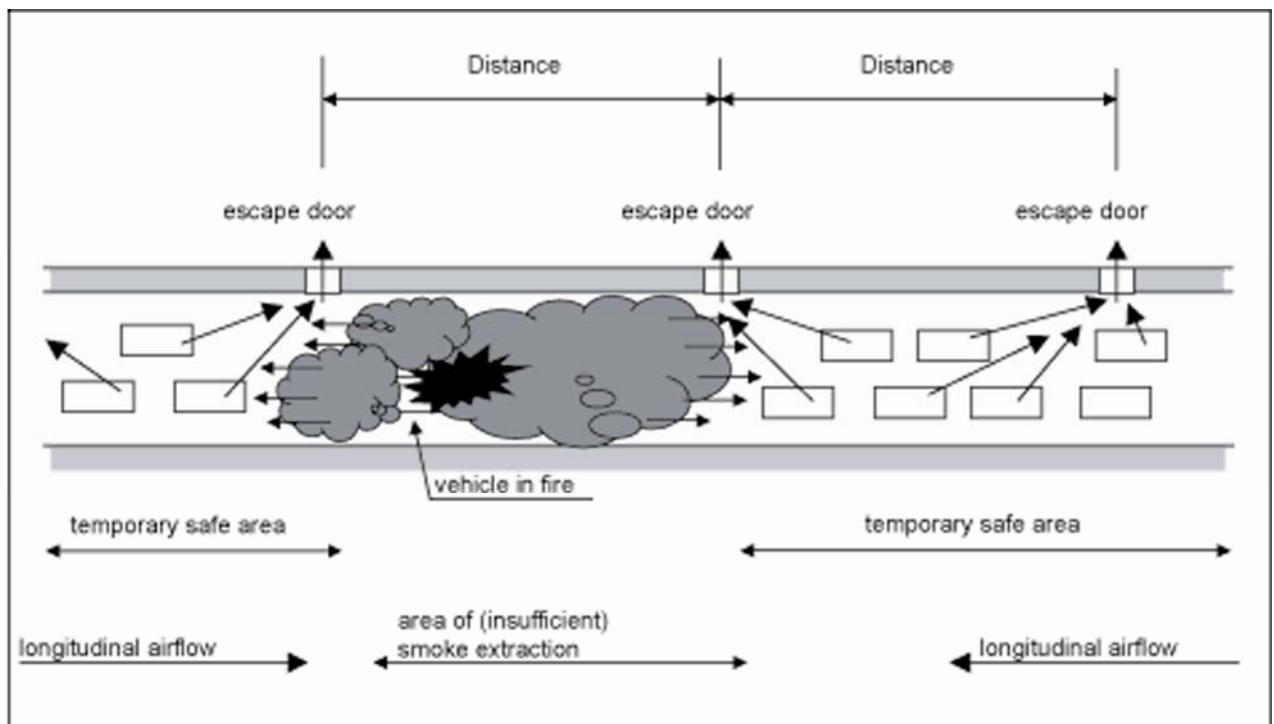
Figure 5.8 - Trafic bidirectionnel et ventilation transversale

### 5.3.5 Pente de la chaussée (déclivité)

La pente longitudinale de la chaussée a une influence sur la vitesse de progression à pied des usagers en train de s'échapper. Mais comme la pente d'une chaussée en tunnel est normalement inférieure à 4 %, on ne peut s'attendre qu'à des modifications mineures et négligeables de la vitesse de marche.

La pente longitudinale influence aussi le répandage des liquides inflammables ou en train de brûler, ainsi que le mouvement des fumées, puisque la pente du plafond est très souvent la même que celle de la chaussée. Dans ce cas, les dispositions d'évacuation sont plus influencées par le type et l'existence de la ventilation.

Longitudinal ventilation is not the most favoured system for bi-directional tunnels because people can be trapped on both sides of the fire, and longitudinal ventilation will worsen the smoke situation in one direction. In such cases, transverse ventilation including control of longitudinal air velocity can offer a good solution (see Figure 5.8). It is important to note that such systems are limited to a certain magnitude of fire (often 30 MW) by the exhaust capacity. If the smoke being generated exceed that capacity, people can be adversely affected. This makes emergency exits very useful in such systems: if people are warned in a timely and efficient manner, and if they react quickly, they should be able to evacuate before the fire develops to a size that cannot be handled by the ventilation system.



**Figure 5.8 - Bi-directional traffic and transverse ventilation**

### 5.3.5 Slope of the Road Surface (Grade)

The longitudinal slope of the roadway can influence the walking speed of people who are escaping. But since roadway tunnel slopes are typically less than 4%, only small and negligible changes in walking speeds are expected.

The longitudinal slope will also influence the spread of burnable or burning liquids, as well as the spread of smoke, since the tunnel ceiling slope is very often the same as the road surface slope. In this case, escape provisions are more influenced by the type and availability of ventilation.

### 5.3.6 Contrôles en tunnel

Dans un tunnel surveillé 24 heures sur 24, il est habituellement possible de détecter rapidement un incendie (boucles dans la chaussée, télévision en circuit fermé ou autres dispositifs), et des instructions peuvent normalement être données rapidement aux usagers (par haut-parleurs, transmission radio, panneaux visuels, etc.), ce qui rend plus efficace l'évacuation.

## 5.4 Évacuation de secours

### 5.4.1 Issues de secours

#### *Inter-distance*

Les têtes d'un tunnel constituent elles-mêmes des issues de secours. Ainsi, pour un tunnel ne possédant pas d'issues de secours supplémentaires, la longueur de l'itinéraire d'évacuation est égale à la longueur totale du tunnel. Ce sont le type d'ouvrage et la longueur de l'itinéraire d'évacuation qui décideront de la nécessité ou non d'itinéraires d'évacuation et de sorties de secours supplémentaires.

Plus la distance entre les issues de secours est courte, plus le niveau de sécurité est élevé. Il est relativement facile d'aménager des issues de secours (passages transversaux) d'un tube à l'autre si les tubes ne sont séparés que par une paroi ou un couloir d'évacuation. Mais, dans le cas de tunnels forés (en terrain rocheux ou meuble), l'aménagement d'issues de secours peut devenir une tâche importante. Compte tenu de ce qui a été dit dans les chapitres précédents, on peut considérer ce qui suit :

- un incendie demande un certain temps pour se développer, donnant ainsi aux usagers le temps de s'échapper. Le temps de développement est relativement indépendant de la puissance ultime de l'incendie ;
- les usagers hésitent généralement à quitter leurs voitures et la zone potentiellement dangereuse. Les instructions données par l'exploitant peuvent les aider à s'échapper plus rapidement. Ces instructions ne peuvent être données que si le tunnel est surveillé, si l'attention de l'exploitant est attirée sur la situation dangereuse par un système de détection, et si l'exploitant a à sa disposition des systèmes de communication tels que transmission radio, haut-parleurs ou panneaux visuels ;
- le type de ventilation – naturelle ou mécanique– détermine si et comment les usagers seront affectés par les fumées. La ventilation doit maintenir les itinéraires d'évacuation exempts de toute fumée, au moins pendant un certain temps. Dans les tunnels non ventilés, les itinéraires d'évacuation doivent être plus courts que dans les tunnels pourvus d'une ventilation mécanique.

La distance optimale entre deux issues de secours est en général estimée entre 100 et 500 m.

### 5.3.6 Tunnel Controls

In a tunnel that is manned on a 24-hour basis, rapid fire detection is usually possible (by loops in the road, CCTV or other provisions), and quick instructions can usually be given to road users (by loud speakers, radio broadcasting, visual signs, etc.), ensuring more efficient escape.

## 5.4 Emergency Egress

### 5.4.1 Emergency Exits

#### ***Spacing***

The tunnel portals are themselves emergency exits. So, for a tunnel without additional emergency exits, the length of the escape route is equal to the total tunnel length. The type of structure and the length of the escape route will dictate whether additional escape routes and emergency exits are necessary.

The shorter the distance between emergency exits, the higher the safety level. Providing emergency exits (cross passages) from tunnel tube to tunnel tube is rather easy if the tubes are divided by only a wall or an escape corridor. However, providing emergency exits for bored tunnels (in rock or soft ground) can become a major task. Based on discussions in the previous sections, the following should be considered:

- a fire needs some time to develop, thus giving road users time to escape. The development time is somewhat independent of the ultimate fire size;
- road users usually hesitate to leave their cars and the potentially dangerous area. Instructions by an operator can help them to escape much quicker. Instructions can only be given if the tunnel is manned, if the operator's attention is drawn to the dangerous situation by some detection system, and if the operator has the availability of communications systems such as radio broadcasting, loudspeakers or visual signs;
- the type of ventilation system – natural or mechanical – determines if and how road users will be affected by smoke. Ventilation must keep escape routes free of smoke, at least for a certain period of time. Escape routes in unventilated tunnels should be shorter than in tunnels with mechanical ventilation.

The optimal distance between two emergency exits is generally estimated to be between 100 and 500 m.