

V. VENTILATION POUR LA MAITRISE DES INCENDIES ET DES FUMÉES

La conception des systèmes de ventilation des tunnels doit conduire au meilleur choix pour faire face aux problèmes suivants :

- dilution des polluants (à l'intérieur du tunnel),
- respect de l'environnement (à l'extérieur du tunnel),
- maîtrise des fumées en cas d'incendie.

La figure 5.1 montre un diagramme possible pour la conception de la ventilation.

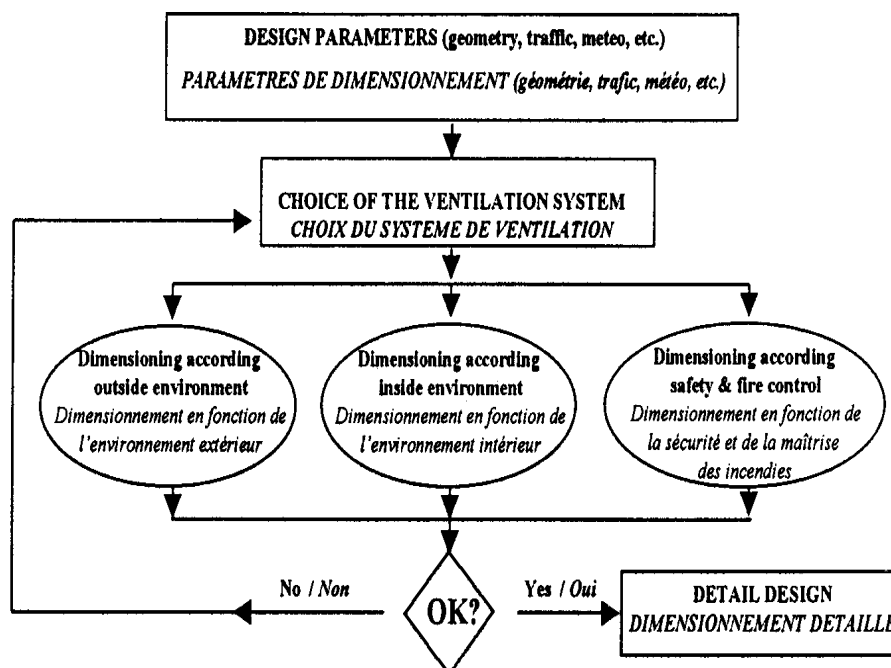


Figure 5.1 - Diagramme possible de conception de la ventilation

Figure 5.1 - Possible logical flow of the ventilation design

Ce chapitre donne des définitions et des critères pour l'évaluation des niveaux de sécurité et le dimensionnement des systèmes de ventilation selon les critères de maîtrise des incendies et des fumées.

Un système de ventilation conçu uniquement à partir des critères environnementaux et de dilution donnera souvent des résultats insatisfaisants du point de vue de la maîtrise des fumées.

De plus, les normes environnementales forcent les constructeurs de véhicules, aujourd'hui plus qu'hier et probablement de plus en plus à l'avenir, à améliorer la technologie de réduction des émissions des véhicules ; ainsi, le débit d'air requis pour le critère de dilution est de plus de plus réduit, de même que la puissance électrique nécessaire. Puisque la maîtrise des fumées est indépendante des améliorations technologiques, ses critères seront à l'avenir décisifs pour un nombre toujours croissant de projets (voir figure 5.2).

V. VENTILATION FOR FIRE AND SMOKE CONTROL

The design of tunnel ventilation systems aims at the best actual choice in order to face the following problems:

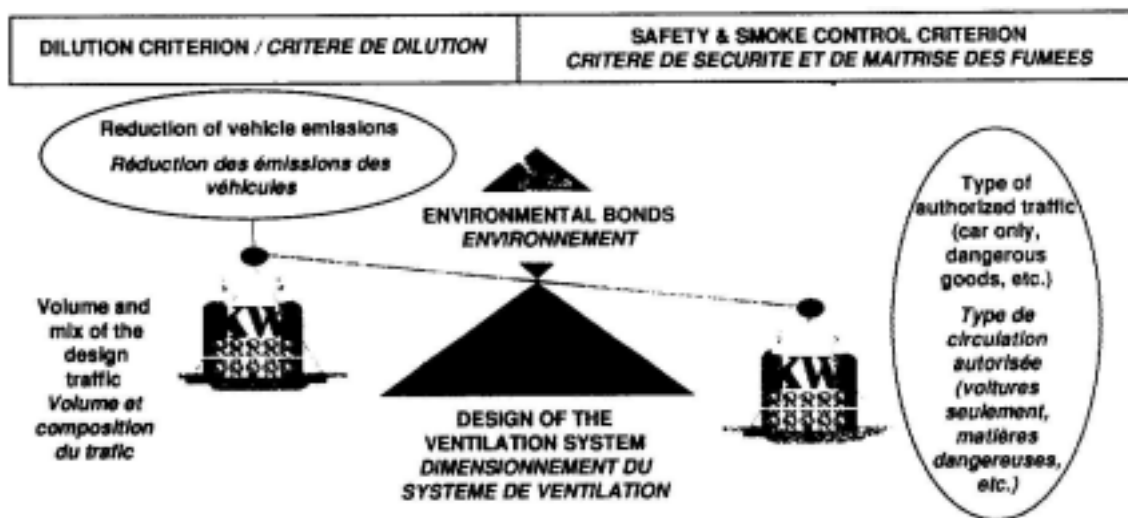
- dilution of air pollutants (inside tunnels),
- environmental issues (outside tunnel),
- smoke control in case of fire.

Figure 5.1 shows a possible logical flow of ventilation design.

This section aims at giving the definitions and criteria for the assessment of the safety levels, and for the dimensioning of the ventilation system according to fire and smoke control criterion.

A ventilation system designed only according to dilution and environmental criteria will often be unsatisfactory from the smoke control point of view.

Furthermore the environmental standards force new vehicle producers (now more than in the past and more and more, probably, in the future) to upgrade their technology to reduce the emissions of the new vehicles; consequently the air flow required to meet the dilution criterion is more and more reducing, and therefore also the required mechanical power. As smoke control is independent of the aforementioned technological upgrading, the smoke control criterion will be, in the future, the decisive one for an increasing number of projects (see figure 5.2).



| | |
|--|--|
| Figure 5.2 - Trends in design of ventilation systems | Figure 5.2 - Tendances dans le dimensionnement des systèmes de ventilation |
|--|--|

Le paragraphe V.1 donne un court aperçu des questions de ventilation avec quelques références aux problèmes de dilution et d'environnement, alors que le reste de ce chapitre ne traite que des recommandations en matière de maîtrise des fumées et des questions qui y sont liées. Des informations générales sont données sur des travaux antérieurs de l'AIPCR (§ V.2), les directives et expériences existantes (§ V.3), de nouveaux résultats de recherches (§ V.4), les objectifs de ventilation pour la maîtrise des incendies et des fumées (§ V.5). Cependant, la majeure partie de ce chapitre est consacrée à des informations détaillées et à des recommandations sur la maîtrise des incendies avec les principaux systèmes de ventilation : naturelle (§ V.6), longitudinale (§ V.7), transversale et semi-transversale (§ V.8).

V.1 Introduction à la ventilation

Une évaluation doit être réalisée en tenant compte du volume d'air nécessaire à la dilution des polluants ainsi que d'autres facteurs comme la longueur du tunnel, sa situation, le type de circulation, les lois sur l'environnement et, facteur non négligeable, la sécurité. Un système de ventilation peut alors ensuite être choisi pour chaque tunnel.

Les systèmes possibles de ventilation sont :

- **la ventilation naturelle** qui peut être :
 - induite par la température de l'air et les conditions météorologiques,
 - induite par la circulation ;

- **la ventilation mécanique** qui peut être :
 - longitudinale,
 - transversale,
 - semi-transversale (et semi-transversale réversible),
 - transversale partielle ;

- **le traitement de l'air combiné à la ventilation mécanique.**

Les principes de chaque méthode sont brièvement décrits ci-après. Les méthodes ne sont pas toujours indépendantes, des combinaisons sont possibles et, dans certains cas, inévitables.

V.1.1 Ventilation naturelle

Un tunnel est ventilé naturellement lorsqu'il n'est pas équipé de ventilateurs pour le contrôle mécanique du courant d'air dans la zone de circulation.

Il existe une certaine ventilation naturelle dans n'importe quel tunnel et sous n'importe quelles conditions : en fait, un renouvellement de l'air est toujours induit par une combinaison de facteurs tels que les conditions atmosphériques et la circulation routière.

Paragraph V.1 is a short overview of the ventilation matters with a few references to dilution and environmental issues, while the remaining part of the section only deals with smoke control recommendations and related issues. Some general information is given of previous work by PIARC (§ V.2), existing guidelines and experience (§ V.3), new research results and physics (§ V.4), objectives of ventilation for fire and smoke control (§ V.5). However, the largest part of the section is devoted to detailed information and recommendations regarding fire control with the main ventilation systems: natural (§ V.6), longitudinal (§ V.7), transverse and semi-transverse (§ V.8).

V.1 Introduction to ventilation

Taking into account the volume of air required for the dilution of pollutants as well as other factors, such as tunnel length, location, type of traffic, environmental laws, and not least, fire safety considerations, an assessment can be performed and the ventilation system can be chosen for each particular tunnel.

The possible ventilation systems are:

- **natural ventilation** which can be:
 - induced by the air temperature and meteorological conditions,
 - induced by traffic;
- **mechanical ventilation** which can be:
 - longitudinal,
 - fully transverse,
 - semi-transverse (and reversible semi-transverse),
 - partial (pseudo) transverse;
- **air cleaning combined with mechanical ventilation.**

The principles of each method are shortly described below. The methods are not always distinct; combinations are possible and, in some cases, unavoidable.

V.1.1 Natural ventilation

We define as “naturally ventilated” a tunnel which is not equipped with fans for the mechanical control of the airflow in the traffic zone.

Some kind of natural ventilation exists in any tunnels and conditions: in fact an air turnover is always induced by a mix of factors such as atmospheric conditions and traffic.

V.1.1.1 Effets météorologiques

Un tunnel peut être suffisamment ventilé par le vent, par une pression atmosphérique différente entre ses têtes et, éventuellement, par un effet de convection ou de cheminée. La ventilation naturelle des tunnels ayant leurs têtes à des altitudes différentes est basiquement un effet de cheminée et, bien qu'il ne soit généralement pas possible de prévoir les têtes d'un tunnel à des hauteurs différentes, il peut exister des situations dans des zones montagneuses où cet effet pourrait être avantageusement envisagé.

V.1.1.2 Ventilation induite par la circulation

Les voies ferrées souterraines sont principalement ventilées par l'effet de pistonement des trains qui entraînent l'air le long du tunnel. L'effet de pistonement peut ventiler des tunnels routiers unidirectionnels bien que la vitesse de l'air induite par les véhicules soit moindre ; en effet, les véhicules ne remplissent pas autant la section transversale que les trains. Cependant, à mesure que le diamètre du tunnel augmente, le gain en volume d'air est marginalement plus grand que la réduction induite de la vitesse de l'air ; en conséquence, la dilution des polluants augmente légèrement avec la section du tunnel.

Même si la ventilation induite par la circulation convient à la dilution des polluants en conditions normales de circulation, des ventilateurs sont souvent prévus pour le cas d'une circulation arrêtée ou au ralenti et pour les conditions de vent défavorables.

La ventilation, dans une grande partie des tunnels routiers du monde, repose sur le vent et la circulation. Généralement, ces tunnels n'excèdent pas quelques centaines de mètres de long, sauf pour les trafics très faibles. Les tunnels dont la ventilation est assurée par le trafic et de 500 m de long sont généralement unidirectionnels. Une ventilation de ce type est courante dans les zones montagneuses. Si cette situation peut convenir pour le critère de dilution, elle n'est souvent pas suffisamment sûre pour la maîtrise des fumées (spécialement pour les tunnels les plus longs).

V.1.2 Ventilation mécanique

Le système de ventilation d'un tunnel doit maintenir une qualité de l'air acceptable en exploitation normale. En cas d'incendie, il doit assurer la sécurité du public dans le cas d'un incendie et également faciliter la lutte contre l'incendie et les opérations de secours. De plus, il doit empêcher la formation d'un mélange explosif. Un mélange explosif ne peut se former au cœur de l'incendie, mais il peut cependant être généré un peu plus loin par une combustion incomplète des gaz chauds.

V.1.2.1 Système longitudinal

Utilisée actuellement dans de nombreux pays, la ventilation longitudinale est la manière la plus facile et la moins coûteuse de ventiler les tunnels. Dans ce cas, la ventilation crée un courant d'air uniforme et longitudinal le long du tunnel.

Dans un tel système, l'air, pratiquement pur, pénètre dans le tunnel par l'entrée et est progressivement pollué par les substances émises par les véhicules ; il atteint ainsi la sortie du tunnel avec un fort degré de pollution. Ce système est relativement bon marché et simple à installer, il est particulièrement recommandé pour les tunnels unidirectionnels où l'effet de pistonement apporte une aide.

V.1.1.1 Meteorological effects

A tunnel may be sufficiently ventilated by wind, by a difference in air pressure between portals, and possibly by some convective or chimney effect. Natural ventilation of tunnels with portals at different elevations is basically a “chimney” effect and although it is generally not possible to arrange tunnel portals at different heights, there may be some situations in mountainous areas where the effect would be worth considering.

V.1.1.2 Traffic induced ventilation

Underground railways are ventilated mainly by the “piston” action of the trains entraining the air along the tunnel. The “piston effect” can ventilate one-way road tunnels although the induced air velocity is less with road vehicles which do not fit the tunnel cross-section as closely as trains. However, as the tunnel diameter increases, the gain of air volume is marginally greater than the reduction of the induced air speed; consequently the dilution of pollutants slightly increases with tunnel size.

Even when the traffic-induced ventilation is adequate for the dilution of pollutants in normal traffic conditions, fans are often provided to cater for idling and slowly-moving traffic and for adverse wind conditions.

A large portion of road tunnels in the world rely on wind and traffic for ventilation. Generally, they are not more than several hundreds meters long, except for very low traffics. Traffic-ventilated tunnels longer than 500 m carry, generally, one-way traffic. Ventilation of this type is common in mountainous areas. If this situation may be fit for the dilution criterion, it is often not safe enough to fit the smoke control criterion (especially for the longest tunnels).

V.1.2 Mechanical ventilation

The ventilation system installed in a tunnel must provide acceptable air quality under normal operation. In the event of a fire, it must ensure safety for the public in the event of a fire, as well as facilitate fire-fighting and emergency operations. Furthermore, the ventilation system must prevent the formation of an explosive mixture during a fire. Although an explosive mixture cannot occur in the seat of the fire, it can be produced farther away through incomplete combustion in the hot flue gases.

V.1.2.1 Longitudinal system

Longitudinal ventilation is an easy and cheap way to ventilate road tunnels, and in several countries it is the only actual way. Longitudinal ventilation means that the ventilation system creates a uniform longitudinal flow of air all along the tunnel.

In such a system, the air enters the tunnel from the portal, practically clean, and gets gradually polluted with substances emitted by vehicles, thus reaching the tunnel exit with a higher percentage of pollution. This system is relatively cheap and easy to install and is particularly suitable for tunnels carrying one-way traffic, where the “piston effect” assists the airflow.

Du point de vue du critère de dilution, la ventilation est considérée satisfaisante lorsque le système est capable de maintenir la concentration de polluants dans le tunnel en dessous de certains seuils, qui sont évidemment inférieurs aux niveaux nocifs pour les usagers qui traversent le tunnel ou qui sont contraints d'y rester arrêtés pendant un certain temps.

Un système de ventilation conçu uniquement en fonction du critère de dilution pourrait suffire du point de vue de la maîtrise des fumées, mais cela s'avère insuffisant la plupart du temps. Le projet doit alors être complété afin de prendre en compte les critères de maîtrise des fumées énumérés au § V.7.2.

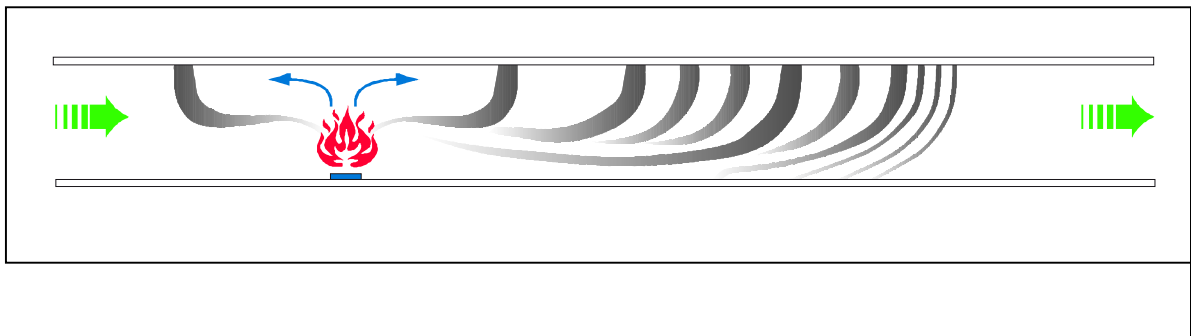


Figure 5.1.1 - Mouvement de la fumée avec une ventilation longitudinale

Figure 5.1.1 - Smoke movement with longitudinal ventilation

Dans les tunnels à ventilation longitudinale, la concentration en substances nocives s'accroît dans la direction du flux d'air et diminue avec le débit d'air pur. La concentration maximale augmente selon la longueur du tunnel. Dans tous les cas, la production de polluants varie avec le volume de circulation, sa vitesse, la déclivité de la chaussée et l'altitude du tunnel. Ainsi, en calculant le débit nécessaire pour la ventilation de deux tunnels ayant le même trafic, on trouvera le débit le plus élevé pour le plus long tunnel et pour celui avec la plus grande pente ascendante.

La vitesse longitudinale de l'air possède une limite supérieure pratique ; par conséquent, pour une circulation et une déclivité données, la longueur du tunnel pour laquelle une ventilation longitudinale est possible est également limitée. En première estimation, la limite supérieure peut être évaluée par la connaissance de la section transversale du tunnel et de la vitesse maximale de l'air (aujourd'hui d'environ 8 à 10 m/s ¹), qui est rentable et ne perturbe pas les véhicules et le personnel travaillant à l'intérieur du tunnel. De plus, la puissance mécanique du système de ventilation augmente en réalité avec la puissance trois de la longueur du tunnel dans les tunnels à circulation bidirectionnelle.

Pour les tunnels qui nécessitent un courant d'air supérieur aux seuils déjà cités, la ventilation longitudinale est toujours possible, mais elle doit être complétée par des puits assurant des échanges massifs entre air vicié et air pur.

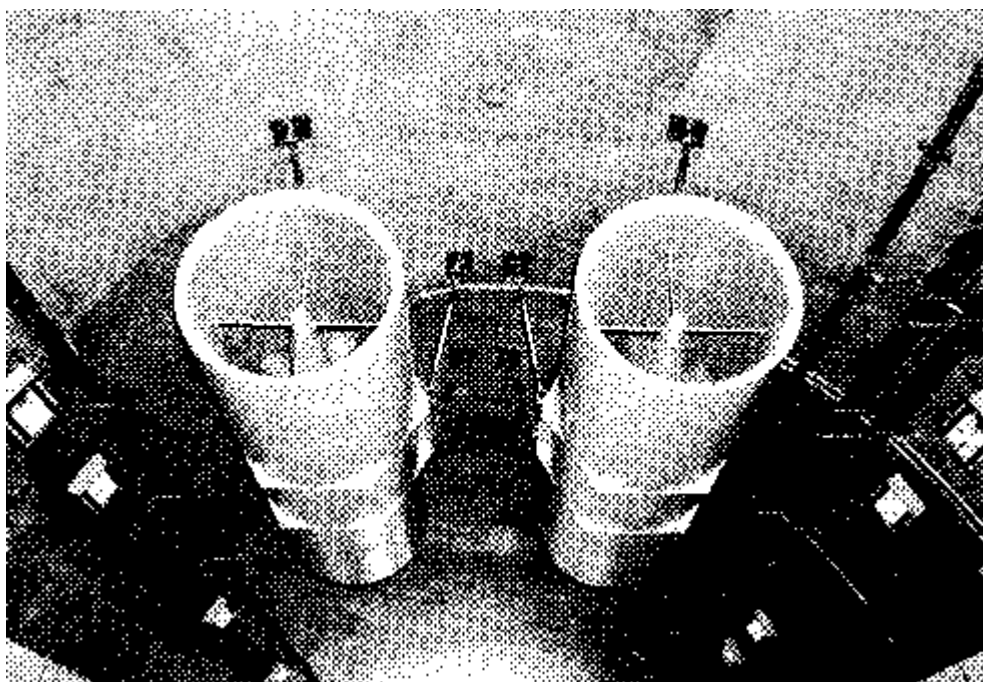
¹ Par exemple, les autorités françaises recommandent une vitesse maximale de l'air de 8 m/s pour des tunnels bidirectionnels et 10 m/s pour des tunnels unidirectionnels.

From the point of view of the dilution criterion, the ventilation is considered satisfactory when the system is able to keep the concentration of pollutants in the tunnel air below certain thresholds, which are obviously under the noxious levels for people who travel throughout the tunnel or who are forced to be stationary within for a while.

A ventilation system designed only according to the above-exposed dilution criterion, could be satisfactory also from the smoke control point of view, but is often not; thus the project has to be verified to take into account the smoke control criteria exposed in § V.7.2.

In tunnels with longitudinal ventilation, the concentration of noxious substances increases in the direction of the airflow and decreases with the fresh air rate. The maximum concentration increases according to the tunnel length. In any cases, the production of pollutants varies with the traffic volume, its velocity, the roadway gradient and the tunnel altitude. Therefore, if we compute the required airflow for the ventilation of two tunnels with the same (flowing) traffic, we would find the greater flow rate for the longer one and for the tunnel with the greater upward slope.

The longitudinal airflow velocity has a practical upper limit; consequently, for a given traffic and slope of the roadway, the tunnel length for which longitudinal ventilation is possible has a maximum limit too. As a first estimate, this upper limit could be evaluated knowing the cross-sectional area of the tunnel and the maximum air velocity (today considered² to be about 8 to 10 m/s) which is cost effective and does not disturb vehicles and the staff operating within the tunnel. Moreover, the mechanical power of the ventilation system increases, in fact, with the third power of the tunnel length in tunnels used bi-directionally.



For tunnels that require an overall airflow over the aforementioned threshold, the longitudinal ventilation is still possible, but it has to be supplemented with shafts for massive exchange of exhaust with fresh air.

Photo 5.1.2.1 - Jet fans in a tunnel in Japan

Photo 5.1.2.1 - Accélérateurs dans un tunnel au Japon

² For instance, the French authorities recommend a maximum air velocity of 8 m/s for two-way tunnels and 10 m/s for one-way tunnels.

La ventilation longitudinale est généralement réalisée à l'aide de ventilateurs hélicoïdes appelés "accélérateurs" ou "ventilateurs de jet" (figure 5.1.2.1) répartis le long du tunnel et en dehors de l'espace de circulation. La taille et la répartition des accélérateurs le long du tunnel n'ont pratiquement aucun effet sur la vitesse de l'air à condition qu'un minimum de règles techniques soit observé. Parfois, la ventilation longitudinale par injection est aussi utilisée, dans laquelle l'effet Saccardo est le moyen de transmission de la poussée.

Il est moins onéreux de concentrer les accélérateurs près des entrées. De cette façon, la longueur des câbles est la plus courte possible. Cependant, d'un point de vue aérodynamique, si les accélérateurs sont trop proches de la sortie, leur efficacité est réduite. Par conséquent, la première et la dernière série d'accélérateurs sont installées au moins à 80 à 100 m à l'intérieur du tunnel.

V.1.2.2 Définitions concernant les autres systèmes de ventilation

Dans les systèmes de ventilation mécanique autre que longitudinale, l'air ventilé est amené et/ou extrait par des gaines construites à cet effet. De tels systèmes sont classés selon le pourcentage d'air frais amené et le pourcentage d'air vicié évacué par des gaines supplémentaires (le pourcentage restant est amené ou évacué par les têtes).

Tableau 5.1.1 - Caractéristiques des différents systèmes de ventilation non longitudinale

| Systèmes de ventilation non longitudinale | Air frais | Air vicié |
|---|--------------------------------------|----------------------------|
| transversal pur | 100 % | 100 % |
| transversal partiel ³ | 100 % (éventuellement intermédiaire) | intermédiaire |
| semi-transversal | 100 % | 0 % |
| semi-transversal réversible - en exploitation normale - en cas d'incendie | 100 % 0 % ≤ débit ≤ 100 % | 0 % 0 % ≤ débit ≤ 100 % |

- Système transversal pur

Dans un système de ventilation transversal pur, il y a une ou plusieurs gaines d'air frais parallèles au tube de circulation. L'air frais est injecté par des bouches réparties le long du tunnel ; l'air vicié est aspiré de la même façon de l'autre côté du tunnel en utilisant une ou plusieurs gaines d'extraction. Dans ce système, la quantité d'air extrait par mètre de tunnel est équivalente à la quantité d'air injecté. Dans certains cas de tranchées couvertes, il n'y a pas de gaines : l'air frais est injecté directement de l'extérieur par de petits ventilateurs, et l'air vicié est expulsé vers l'extérieur de la même façon. Les deux flux d'air (air frais injecté et air vicié extrait) créent un courant d'air dans le tube principal, le sens de ce courant d'air étant transversal à l'axe longitudinal du tunnel.

³ Le type le plus commun des systèmes de ventilation transversaux partiels n'évacue qu'une fraction de l'air vicié par rapport au total d'air frais fourni (100 %) par des gaines supplémentaires. Par conséquent, une certaine quantité d'air vicié est évacuée par les têtes du tunnel. Par exemple, à l'origine, chaque moitié du tunnel du Mont-Blanc était équipée d'un système de ventilation capable d'injecter 600 m³/s (100 %) d'air frais et d'extraire seulement 300 m³/s (50 %) d'air vicié. Les 50 % restants étaient chassés par les têtes du tunnel. Plus tard, le système fut modifié en système semi-transversal réversible, avec une injection de 900 m³/s (100 %) et aucune extraction en conditions normales d'exploitation.

Longitudinal ventilation is generally performed by axial-flow fans called "jet fans" or "boosters" (Figure 5.1.2.1) distributed along the tunnel and outside the traffic gauge. The size and distribution of the jet fans along the tunnel have practically no effect on the overall tunnel air velocity provided that a few technical rules are observed. Sometimes also the longitudinal ventilation by injection is used, where the Saccardo effect is the way of transmission of the thrust.

The cheapest criterion for the installation is the concentration of fans near the portals. In this way the length of cables is the shortest possible. From the aerodynamics point of view, if the fans are too close to the exit their efficiency is reduced. Consequently the first and last sets of fans are usually installed at least 80-100 m within the tunnel.

V.1.2.2 Definitions concerning other ventilation systems

In mechanical ventilation systems other than longitudinal, the ventilation air is supplied and/or extracted through purpose built ducts. Such systems are hereinafter classified through the percentage of fresh air that is supplied and the percentage of exhaust air that is evacuated through additional ducts (being the remaining part supplied/evacuated through the tunnel portals).

Table 5.1.1 - Characteristics of different non-longitudinal ventilation systems

| Non-longitudinal ventilation systems | Fresh air | Exhaust air |
|--|------------------------------|------------------------|
| Fully transverse | 100% | 100% |
| Partial (pseudo) transverse ⁴ | 100% (possibly intermediate) | intermediate |
| Semi transverse | 100% | 0% |
| Reversible semi transverse - in normal operation - in case of fire | 100% 0% ≤ flow ≤ 100% | 0% 0% ≤ flow ≤ 100% |

- Fully-transverse system

In fully-transverse ventilation systems there is one or more fresh air ducts that lay parallel to the traffic tube. The fresh air is supplied through louvers distributed all along the tunnel; the exhaust air is removed in the same way from the opposite side of the tunnel by using one or more exhaust ducts. In this system, the amount of exhausted air per metre of tunnel length equals the amount of supplied air. In some cases of cut-and-covers, there are no ducts: the fresh air is injected directly from outside through small fans, and the exhaust air is discharged in the same way directly to the outside. The two air streams (injected fresh air and extracted exhaust air) create a flow in the main tube, the direction of which is transverse to the longitudinal axis of the tunnel.

⁴ The most common type of pseudo-transverse ventilation system is the one with an "intermediate" value for the exhaust air evacuated through additional ducts and the full amount of fresh air (100%) supplied. Consequently a certain amount of exhaust air is evacuated through the portals of the main tunnel. As an example, we can consider that originally each half of the Monte Bianco tunnel was equipped with a ventilation system able to perform the inlet of 600 m³/s (100%) while extracting only 300 m³/s (50%) of exhaust air. The remaining 50% was blown out through the tunnel portals. Later the system was turned to reversible semi-transverse system, with an injection of 900 m³/s (100%) and no extraction under normal operation.

Un tel courant d'air est perturbé par d'autres facteurs (différences de pression du vent aux têtes du tunnel, différences de pression atmosphérique, incendie dans le tunnel, etc.), qui créent un courant d'air longitudinal. Cela signifie qu'en pratique, un courant d'air purement perpendiculaire à l'axe longitudinal du tunnel sera peu probable. Un deuxième aspect à noter est que le courant d'air longitudinal est difficile à contrôler, même si la capacité du système de ventilation transversale est grande, car il n'existe pas de forces compensatrices dans le sens longitudinal. La manière la plus répandue d'avoir un quelconque contrôle sur ce courant d'air longitudinal est de créer des cantons de ventilation indépendants et successifs dans lesquels l'injection et l'extraction d'air peuvent être réalisées séparément.

La concentration de pollution dans l'air est constante tout au long du tunnel (s'il n'y a pas de courant d'air longitudinal). Ce système est donc applicable dans les grands tunnels. En principe, il n'y a pas de limite à la longueur du tunnel en ce qui concerne l'évacuation de la pollution, mais des restrictions économiques et techniques entrent bien sûr en ligne de compte.

L'air ventilé est amené et extrait grâce à des gaines construites à cet effet. Le volume total d'air ventilé nécessaire est considérable, spécialement dans les grands tunnels. De fait, les gaines sont grandes et bien évidemment onéreuses. La capacité des ventilateurs est en grande partie déterminée par la vitesse de l'air dans les gaines. Dans les grands tunnels, les gaines sont donc divisées longitudinalement en cantons, l'air est fourni en des endroits différents afin de restreindre la vitesse de l'air dans les différents cantons. Des vitesses de 15 à 25 m/s dans les gaines d'air lorsqu'elles sont à pleine charge sont fréquentes. Comme déjà mentionné, créer plusieurs cantons de ventilation indépendants permet également d'avoir un certain contrôle du courant d'air longitudinal. Les ventilateurs sont généralement installés près des entrées du tunnel pour une meilleure accessibilité, ou dans des usines souterraines.

En cas d'incendie, la gaine d'aspiration de l'air vicié dans la zone de l'incendie fonctionne en aspiration totale et les cantons de ventilation voisins sont contrôlés de manière à ce que la vitesse longitudinale de l'air au cœur de l'incendie pousse les fumées dans le bon sens. Cependant, l'expérience montre que, dans les petits tunnels et sous l'influence du vent et de l'effet de cheminée des fumées chaudes, il n'est pas aisé de contrôler la direction et la vitesse de l'air dans la zone de l'incendie.

Such flow is perturbed by other factors (differences in wind pressure on tunnel openings, atmospheric pressure differences, traffic, fire in the tunnel, etc.) which create a longitudinal airflow. This means that, in practice, a flow which is purely transverse to the longitudinal axis of the tunnel will hardly ever occur. A second aspect which attracts the attention is that the longitudinal airflow is difficult to control even if the transverse ventilation system has a large capacity because there are no compensating forces present in the longitudinal direction. The most usual way to get some control on this longitudinal airflow is to create successive independent ventilation sections in which fresh air injection and/or exhaust air extraction can be operated separately.

The concentration of pollution in the air is constant all over the tunnel (if there is no longitudinal airflow). This system is therefore suitable for application in long tunnels. In principle there is no limit to the tunnel length as far as the pollution removal is concerned; but of course technical and economic restrictions apply.

The ventilating air is generally supplied and extracted through purpose built air ducts. The total volume of ventilating air required is considerable, especially in long tunnels. As a result the ducts are large and therefore expensive. The air velocity in the ducts determines the required capacity of the fans to a significant extent. In long tunnels the ducts system is therefore longitudinally divided into sections and the air is supplied at various places in order to restrict the air speed in the various sections. Speeds of 15 to 25 m/s in the air ducts under full load conditions are usual. As already mentioned, creating several independent ventilation sections also provides a means to have some control on the longitudinal airflow. The fans are usually installed near the tunnel portals in order to be easy to reach, or in underground plants.

In case of a fire, the exhaust air duct in the fire area is turned on to full exhaust and the neighbouring ventilation sections are controlled in such a way that a longitudinal air velocity in the fire zone can move the smoke in a suitable way. However, experience shows that, in short tunnels and under the influence of the wind and chimney effect of the hot smoke, it is not easy to control the air direction and speed in the fire zone.

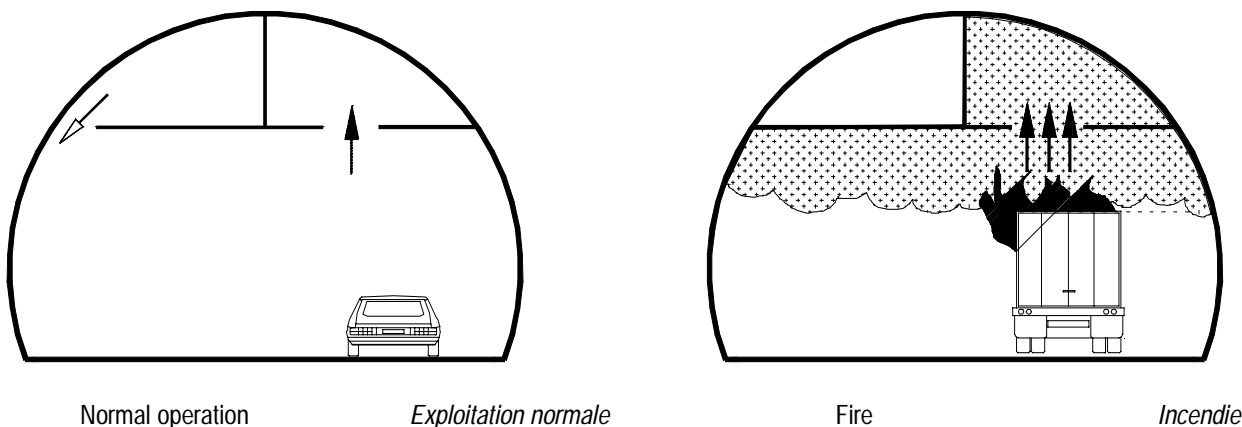


Figure 5.1.2 - Example of a transverse ventilation system (without secondary supply ducts to pavement level)

Figure 5.1.2 - Exemple d'un système de ventilation transversale (sans carneaux descendant au niveau du sol)

- *Système semi-transversal (et semi-transversal réversible)*

Dans un système de ventilation semi-transversal, l'air extérieur est injecté de façon uniforme le long du tunnel, généralement par une gaine de ventilation, mais il n'y a pas extraction de l'air vicié : l'air frais est fourni transversalement à l'axe longitudinal du tunnel alors que l'air vicié s'écoule longitudinalement vers les sorties.

Dans un système de ventilation semi-transversale réversible, il est possible d'inverser le sens du courant dans les gaines : l'air frais pénètre alors dans le tunnel par les têtes (parallèlement à l'axe longitudinal) alors que l'air vicié est extrait à l'aide des bouches et des gaines réversibles. Ainsi l'extraction induit un courant d'air longitudinal qui provient des deux têtes ou des cantons de ventilation voisins qui fournissent toujours de l'air. Ce mode d'exploitation est généralement réservé aux cas d'incendies en tunnel. Il est également possible d'avoir une gaine séparée d'extraction des fumées, qui n'est utilisée qu'en cas d'incendie.

Tout comme pour la ventilation transversale, des facteurs externes peuvent créer un courant d'air longitudinal difficile à contrôler.

- *Système transversal partiel*

Les systèmes de ventilation transversale partielle se situent entre les systèmes transversaux et semi-transversaux ; ils possèdent donc des caractéristiques intermédiaires qui peuvent être plus ou moins similaires à l'un ou l'autre système, selon le pourcentage d'air injecté ou extrait.

En tout cas, les études techniques sont semblables aux systèmes transversaux, car il est nécessaire de traiter à la fois l'air frais et l'air vicié (bien que dans les systèmes transversaux partiels, les gaines d'air frais et d'air vicié ne soient pas habituellement équilibrées). Il est aussi possible d'ajouter des accélérateurs afin de créer et de maintenir le courant d'air longitudinal désiré, spécialement en cas d'incendie.

Remarque : en Suisse, certains tunnels ne sont dotés que de puits d'extraction.

V.1.3 Traitement de l'air combiné à la ventilation mécanique

L'air vicié à l'intérieur du tunnel peut être traité, réduisant ainsi le niveau de pollution pour :

- diminuer le volume d'air nécessaire à la ventilation,
- réduire la pollution globale aux têtes et aux cheminées.

Les installations actuelles sont principalement fondées sur des précipitateurs électrostatiques capables d'extraire les poussières et les suies de l'air du tunnel.

En raison de la forte proportion de camions dans les tunnels japonais, le premier paramètre qui y atteint le seuil critique de pollution est la visibilité. C'est pourquoi c'est au Japon qu'a été appliqué pour la première fois un système capable de réduire la concentration des particules solides à l'intérieur du tunnel.

- Semi-transverse system (and reversible semi-transverse system)

In a semi-transverse ventilation system, outside air is added equally along the tunnel, generally out of an air supply duct, but there is no air extraction: the fresh air is supplied transversely to the direction of the longitudinal axis of the tunnel while the polluted air flows longitudinally to the two portals.

In reversible semi-transverse ventilation, it is possible to reverse the airflow direction in the ducts: the fresh air then flows into the tunnel from the portals (therefore with a direction parallel to the longitudinal axis) while the exhaust flow is extracted through louvers and the reversible air ducts. So this extraction induces a longitudinal airflow along the tunnel which comes from the two portals or neighbouring ventilation sections still running on air supply. This operational mode is generally reserved to the event of fire within the tunnel. Another possibility to deal with fires is to have a separate smoke extraction duct which is used only in case of fire.

Just as in transverse ventilation, in semi-transverse ventilation external factors can create a longitudinal airflow which is difficult to control.

- Partial (pseudo) transverse system

Partial transverse (also called pseudo-transverse) ventilation systems are intermediate between transverse and semi-transverse systems and have therefore intermediate characteristics that can be more similar to the first or the second one depending on what percentage of the ventilation flow is injected or extracted.

In any case the engineering works are similar to the transverse system, being necessary to deal with both fresh and exhaust air (though in partial transverse systems, fresh and exhaust ducts are usually not balanced). It is also possible to add jet fans to the tunnel in order to create and maintain the desired longitudinal air flow, especially for the case of fire.

Remark: In Switzerland, there are some tunnels with only exhaust shafts.

V.1.3 Air cleaning combined with mechanical ventilation

The exhaust air within the tunnel can be cleaned, reducing the relevant pollution level in order:

- to lessen the airflow rate required for the ventilation of the tunnel,
- to reduce the overall pollution released at tunnel portals and shafts.

The present applications mainly rely on electrostatic precipitators able to collect dust and soot from the tunnel air.

Given the high proportion of trucks within the Japanese tunnels, the visibility is the pollution parameter that first reaches the relevant threshold. For this reason, first in Japan, a system able to reduce the concentration of solid particles within the tunnel air has been applied.

Plusieurs tunnels à Oslo (Norvège) sont aussi équipés d'un système pour le traitement de l'air, car il existe une forte concentration de poussière dans les tunnels en hiver lorsque les véhicules sont équipés de pneus à clous.

Des programmes complémentaires de recherche sont en cours dans ces deux pays et également en Autriche (tunnel de Plabutsch) et en Allemagne (tunnel de l'Elbe). Certains d'entre eux ont pour but l'enlèvement du CO, du NO_x et des hydrocarbures. Le plus récent porte sur le traitement biologique de l'air à des fins de protection de l'environnement.

Une voie intéressante a été ouverte par la recherche sur les filtres électrostatiques capables d'extraire la poussière et la suie des fumées chaudes d'un incendie afin d'améliorer la visibilité. Les résultats sont encourageants et montrent que la visibilité peut être améliorée en précipitant les particules de fumée. Cependant, cette technologie n'a jamais été appliquée comme moyen unique de lutte contre l'incendie.

V.2 Travaux antérieurs de l'AIPCR

Pratiquement tous les rapports du Comité des Tunnels routiers aux Congrès mondiaux de la Route ont traité du problème de la ventilation des tunnels, de ses lois physiques, des taux d'émission des polluants, des niveaux maximaux admissibles des polluants, etc.

Les rapports énumérés ci-après traitent également de la ventilation en cas d'incendie :

- tunnels routiers : émissions, ventilation, environnement [84],
- rapport au XX^e Congrès mondial de la Route [17], (p. 60-79),
- rapport au XIX^e Congrès mondial de la Route [18], (p. 43-57),
- rapport au XVIII^e Congrès mondial de la Route [19], (p. 67-74),
- rapport au XVII^e Congrès mondial de la Route [27], (p. 68-70, p. 81),
- rapport au XVI^e Congrès mondial de la Route [26], (p. 48-52).

V.3 Directives et expérience existantes

De nombreuses directives sur la ventilation des tunnels, la sécurité et la gestion des incendies existent de par le monde.

- L'Association routière du **Japon** a publié des directives de ventilation (en japonais [85]) ; les plus importantes sont reprises dans un mémorandum technique du PWRI [86].
- En **Allemagne**, les concepteurs se réfèrent aux directives du RABT [50].
- Aux **Pays-Bas**, les concepteurs suivent les recommandations néerlandaises [87].
- En **France**, les concepteurs appliquent les directives de ventilation du CETU [88; 89].
- En **Autriche**, les concepteurs se réfèrent aux directives de la FVS [90]
- Dans les **Pays nordiques**, les concepteurs suivent leurs directives de ventilation [91]
- En **Norvège**, les concepteurs se réfèrent aux normes de l'administration publique des routes [92].
- En **Suède**, les concepteurs appliquent les spécifications techniques générales [93].

Dans de nombreux autres pays, seuls les rapports AIPCR servent de référence.

Several tunnels in Oslo (Norway) are also equipped with a system for air cleaning because a high concentration of dust affects the tunnel air in wintertime when vehicles are equipped with studded tires.

Complementary research programmes on the topic are under development in these two countries and also in Austria (Plabutsch tunnel) and Germany (Elbe tunnel). Some of them aim at removing CO, NO_x and hydrocarbons. The latest research programme deals with the use of biological cleaning of the air for environmental purposes.

There is an interesting line of research on electrostatic filters able to collect dust and soot from the hot smoke of a fire, to improve the visibility. There are encouraging results that show that the visibility can be improved by precipitating the particles from the fire smoke. However, this technology has never been applied as the only fire control measure.

V.2 Previous work by PIARC

Every report of the Committee on Road Tunnels for the successive World Road Congresses has dealt with the problem of tunnel ventilation, its physics, the pollutants emission rates, maximum allowed pollutant levels, etc.

The reports listed below deal with the problem of ventilation in case of fire also:

- Publication on Road Tunnels: Emissions, Ventilation, Environment [84],
- Report for the XXth World Road Congress [17], (p. 60-79),
- Report for the XIXth World Road Congress [18], (p. 43-57),
- Report for the XVIIIth World Road Congress [19], (p. 67-74),
- Report for the XVIIth World Road Congress [27], (p. 68-70, p. 81),
- Report for the XVIth World Road Congress [26], (p. 48-52).

V.3 Existing guidelines and experience

Several guidelines dealing with tunnel ventilation, fire safety design and fire management exist all over the world.

- The **Japan** Road Association wrote ventilation guidelines (in Japanese [85]). The most important points are reported in a Technical memorandum of PWRI [86].
- In **Germany** designers refer to the guidelines from RABT [50].
- In the **Netherlands** designers refer to the Dutch Recommendations [87].
- In **France** designers refer to the ventilation guidelines of CETU [88 ; 89].
- In **Austria** designers refer to the guidelines from FVS [90].
- In **Nordic countries** designers refer to the ventilation guidelines [91].
- In **Norway** designers refer to the standards of the Public Roads Administration [92].
- In **Sweden** designers refer to the general technical specification [93].

In many other countries designers only refer to the PIARC reports.

V.4 Nouveaux résultats de recherches - Physique

L'annexe de ce chapitre décrit l'expérience des Pays-Bas sur la résistance à l'incendie des accélérateurs. D'autres résultats intéressants sur les questions abordées ont été décrits dans les chapitres III et IV.

Il est conseillé de se reporter à ces chapitres pour plus de détails sur les nouvelles recherches en matière de ventilation pour la maîtrise de l'incendie et des fumées.

V.5 Objectifs de la ventilation pour la maîtrise de l'incendie et des fumées

Du point de vue de la sécurité en cas d'incendie, les critères suivants doivent être appliqués lors de la conception :

1. L'objectif du contrôle de la propagation de la fumée est de maintenir le plus longtemps possible les personnes dans une zone libre de toute fumée ; cela signifie que soit la stratification de la fumée doit être conservée intacte, laissant une zone plus ou moins claire et respirable sous la couche de fumée (cela est préférable dans des tunnels à circulation bidirectionnelle ou à circulation unidirectionnelle congestionnée) ; soit la fumée doit être totalement refoulée vers un côté de l'incendie (cela sera de préférence appliqué dans des tunnels à circulation unidirectionnelle non congestionnée lorsqu'il n'y a normalement aucun usager en aval de l'incendie).
2. Dans tous les cas, les usagers doivent pouvoir atteindre un lieu sûr en un temps et sur une distance suffisamment courts (voir chapitre I) ; par conséquent, des sorties de secours ou des abris ventilés résistant au feu doivent être installés où cela est nécessaire (voir chapitre VI).
3. Le système de ventilation doit pouvoir maintenir les ouvrages non touchés par l'incendie libres de toute fumée (sorties de secours, deuxième tube d'un tunnel, etc.).
4. Le système de ventilation doit être capable d'assurer de bonnes conditions pour la lutte contre l'incendie.
5. En cas d'incendie d'essence, il faut éviter les explosions secondaires dues à une combustion incomplète. Le système de ventilation doit alors pouvoir fournir suffisamment d'air pour une combustion ou dilution complète des gaz explosifs. Il faut également un bon système de drainage afin de réduire la zone d'évaporation de l'essence.

V.6 Recommandations sur la ventilation naturelle

La ventilation naturelle repose sur des phénomènes naturels et sur la circulation. Ce système de ventilation peut s'avérer très efficace pour la dilution des polluants (principalement pour les tunnels unidirectionnels) ; mais du point de vue sécurité, il n'est pas possible de se fier à ce système. En fait, lors d'un incendie en tunnel, la circulation est généralement interrompue et la ventilation provient uniquement de phénomènes naturels qui ne peuvent être que partiellement déterministes (comme l'effet de cheminée) ; mais le principal composant de la ventilation reste inconnu (comme les composants météorologiques) et n'est, bien évidemment, pas fiable.

V.4 New research results and physics

The appendix of this section describes the experience of the Netherlands on heat resistance of jet fans. Other interesting results are related with the issues discussed in sections III and IV.

Please refer to these sections for further details on new research on ventilation for fire and smoke control.

V.5 Objectives of ventilation for fire and smoke control

From the point of view of safety in case of fire, the following criteria have to be applied in the design:

1. The purpose of controlling the spread of smoke is to keep people as long as possible in a smoke-free part of the traffic room. This means that either the smoke stratification must be kept intact, leaving more or less clear and breathable air underneath the smoke layer (this is applicable to bi-directional or congested unidirectional tunnels) or/and to completely push the smoke to one side of the fire (this should preferably be applied to non-congested unidirectional tunnels where there are normally no people downstream of the fire).
2. People must, in any cases, be able to reach a safe place in a reasonably short time and covering a reasonably short distance (see section I). Therefore facilities such as emergency exits or fireproof shelters should be provided whenever necessary (see section VI).
3. The ventilation system must be able to keep clear of smoke the air in unharmed structures (escape routes, twin traffic tube, etc.)
4. The ventilation system must be able to produce good conditions for fire fighting.
5. In case of a petrol fire, secondary explosions due to incomplete combustion have to be avoided. The ventilation system must therefore be able to deliver enough air for the complete combustion or dilution of explosive gases. A suitable drainage system should be provided in order to minimise the area where fuel evaporation takes place.

V.6 Recommendations on natural ventilation

Natural ventilation relies on natural phenomena and traffic to renew the air in the tunnel. This ventilation system can be very effective for the dilution of pollutants (especially for one-way tunnels), but it is not possible to rely upon the natural ventilation for safety purposes. In fact in the event of a fire in the tunnel, the traffic will probably stop and the ventilation is only provided by natural phenomena that could be only partially deterministic (as chimney effect), but the main component of the ventilation will be quite uncertain (as meteorological components) and therefore unreliable.

Pour cette raison, plusieurs pays ont publié des directives pour limiter l'application de la ventilation naturelle. Quelques-unes d'entre elles sont présentées ci-après.

- **Allemagne** : les normes RABT de 1994 [50] estiment qu'un tunnel de 350 m de long (et jusqu'à 700 m) est suffisamment sûr en cas d'incendie sans sorties de secours ni ventilation mécanique.
- **France** : les tunnels sur le réseau national [89] nécessitent des mesures de contrôle des fumées au-delà des longueurs suivantes :
 - tunnels urbains : 300 m
 - tunnels non urbains : 500 m (généralement)
 - tunnels non urbains : jusqu'à 800-1 000 m (si trafic < 2 000 véh/jour par sens de circulation).
- **Royaume-Uni** : la longueur de tunnel avec ventilation naturelle peut atteindre 400 m, mais il faut apporter des justifications.
- **Pays-Bas** : les mesures sont décidées après analyse des risques.
- **États-Unis** : la ventilation naturelle peut être utilisée pour un tunnel de longueur maximale de 240 m (800 ft) (directive NFPA 502).

Recommandations

En raison du nombre de paramètres qui interfèrent sur le choix de ventiler ou non un tunnel (longueur, situation, circulation, type de véhicules traversant le tunnel, etc.), il n'est pas possible à l'heure actuelle d'exprimer des recommandations universelles sur les limites de la ventilation naturelle, tout spécialement la longueur admissible sans ventilation mécanique. Les lecteurs de ce rapport pourront utiliser comme référence les recommandations nationales énumérées ci-dessus.

V.7 Recommandations sur la ventilation longitudinale

V.7.1 Généralités sur le désenfumage en ventilation longitudinale

Dans les systèmes de ventilation longitudinale utilisant des accélérateurs ou le système Saccardo (c'est-à-dire des injecteurs d'air), un courant d'air longitudinal pousse tous les gaz de l'entrée vers la sortie.

En cas d'incendie à l'intérieur du tunnel, la seule façon d'évacuer la fumée est de la pousser à travers le tunnel en direction d'une des têtes. Cependant, la vitesse de l'air nécessaire à une telle opération provoque des turbulences et influe sur la stratification de la fumée en aval de l'incendie. Plus la vitesse de l'air est élevée, plus ce phénomène est évident. La stratification de la fumée peut également être perturbée par la pente longitudinale du tunnel (surtout lorsque l'air descend) et par les véhicules.

For this reason several countries issued guidelines to limit the application of natural ventilation. Some of the above-mentioned guidelines are outlined hereafter.

- **Germany:** the RABT standards of 1994 [50] regard a tunnel length of 350 m (and up to 700 m) as safe enough in case of fire without emergency exits and mechanical ventilation.
- **France:** tunnels in the French national network [89] need smoke control measures beyond the following lengths:
 - urban: 300 m
 - not urban: 500 m (generally)
 - not urban: up to 800-1000 m
(if traffic < 2000 veh/day per traffic direction).
- **United Kingdom:** the tunnel length with natural ventilation can reach 400 m, but requires justification.
- **Netherlands:** the measures are decided by a risk analysis.
- **United States:** natural ventilation can be used for a tunnel length up to 240 m (800 ft) in the current NFPA 502 guideline.

Recommendations

Because of the number of different parameters which interfere in the choice to ventilate or not a tunnel (length, location, traffic, type of vehicles using the tunnel, etc.), it is not possible at this moment to express universal recommendations about the limits of the natural ventilation, especially the allowable length without mechanical ventilation. The reader of this document can use the above-mentioned national recommendations as a reference.

V.7 Recommendations on longitudinal ventilation

V.7.1 Generalities on smoke control using longitudinal ventilation

In longitudinal ventilation systems, using jet fans or Saccardo system (i.e. air injectors), a longitudinal airflow sweeps all exhaust gases from the entrance to the exit portal.

In case of fire inside the tunnel, generally, the only feasible way to evacuate smoke is pushing it through the tunnel to the portal. However, the airflow velocity necessary for such operation is the cause of turbulence and affects the smoke stratification downstream of the fire. This phenomenon is the more evident the higher the air velocity. The smoke stratification can also be upset by the longitudinal slope of the tunnel (especially when air flows downwards) and by vehicles.

La fumée d'incendie dans un tunnel sans déclivité aura naturellement tendance à se propager dans les deux directions en raison de la poussée hydrostatique. Si la ventilation est en fonctionnement, la fumée aura alors tendance à suivre la direction du courant d'air de ventilation. A de faibles vitesses de l'air, le mouvement hydrostatique induit n'est pas entièrement maîtrisé et un peu de fumée s'écoulera en amont, ce qui est souvent appelé "remontée de fumée".

La distance de remontée des fumées peut être définie comme la distance de l'incendie à laquelle la vitesse de la fumée en amont est annulée par le débit de ventilation du tunnel. Ainsi, une distance de remontée des fumées égale à zéro signifierait qu'il n'y a aucune fumée en amont. La vitesse de l'air nécessaire pour remplir cette condition est appelée "vitesse critique". Une équation simple a souvent été utilisée pour définir la vitesse de l'air nécessaire pour éviter la remontée de fumée :

$$V_c = K_1 K_2 \left[\frac{gHQ}{\rho_\infty C_p A \left(\frac{Q}{\rho_\infty C_p A V_c} + T_\infty \right)} \right]^{1/3}$$

où V_c est la vitesse critique, K_1 et K_2 sont des constantes, g est l'accélération de la pesanteur, H est la hauteur du tunnel, Q est la puissance thermique de l'incendie, A est la section transversale du tunnel, C_p la chaleur massique de l'air, ρ_∞ et T_∞ sont la masse volumique et la température de l'air ambiant.

La vitesse de l'air permettant d'éviter la remontée de fumée dépend donc de la puissance Q de la section A du tunnel et de la hauteur H . Cela est indiqué sur la figure 5.7.1 en fonction de Q pour des paramètres donnés. On peut voir que la vitesse augmente avec la taille de l'incendie, mais se stabilise à mesure que la puissance augmente.

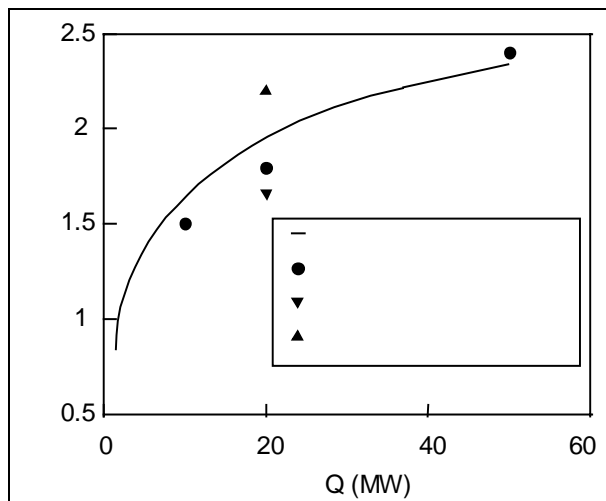


Figure 5.7.1 - Predicted critical velocity (V_c). The formula is used with height = 4.2 m; section = 37.8 m²

Ce comportement général a été confirmé par des simulations numériques [94] : certains des résultats sont présentés à la figure 5.7.1 (prévisions). On peut constater qu'il existe une certaine variation entre la simulation et l'équation empirique. Les analyses numériques en 3D prennent en compte des facteurs comme la largeur de l'incendie, dont l'influence a été démontrée.

Smoke from a fire in a tunnel with no slope will naturally tend to propagate in both directions due to buoyancy effects. If the ventilation is in operation, then the smoke will tend to be driven in the direction of the ventilation airflow. At low tunnel airflow speeds, the buoyancy induced flow is not entirely overcome, and some smoke will flow upstream, which is often termed "backlayering".

The backlayering distance may be defined as the distance from the fire where the upstream smoke velocity is cancelled by the tunnel ventilation flow. Hence a backlayering distance of zero would imply that no smoke flows upstream. The tunnel air velocity required to achieve this condition is termed the "critical velocity". A simple equation has often been used to determine the tunnel air velocity required to prevent backlayering:

$$V_c = K_1 K_2 \left[\frac{gHQ}{\rho_\infty C_p A \left(\frac{Q}{\rho_\infty C_p A V_c} + T_\infty \right)} \right]^{1/3}$$

where V_c is the critical velocity, K_1 and K_2 are constants, g is the acceleration due to gravity, H is the tunnel height, Q is the fire heat release rate, A is the tunnel cross-sectional area, C_p the specific heat of air, ρ_∞ and T_∞ are density and temperature of ambient air.

So the air velocity to prevent the backlayering depends on the fire heat release rate Q , the tunnel area A and height H . It is plotted in Figure 5.7.1 against variable Q for fixed tunnel parameters. It can be seen that the velocity increases with fire heat release rate, but levels off as the heat release rate increases.

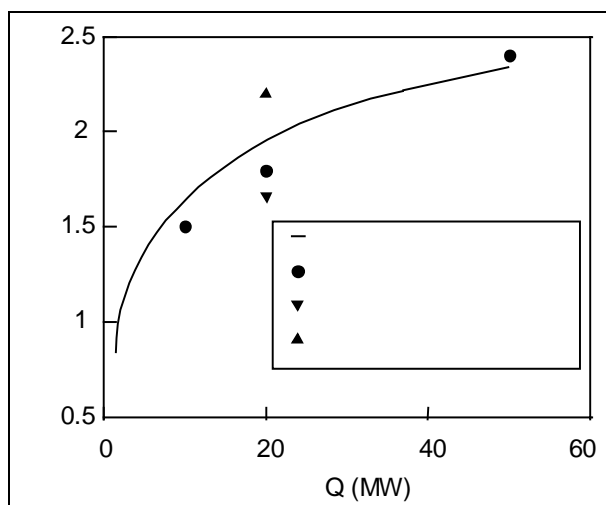


Figure 5.7.1 - Vitesse critique prévue (V_c).
La formule est utilisée dans le cas
d'une hauteur de 4,2 m
et d'une section de 37,8 m²

This general behaviour has been confirmed by computer simulation [94]: some of the results are also shown in Figure 5.7.1 ("prediction"). It can be seen that there is some variability between the simulation and the empirical equation. The three-dimensional computer analysis takes into account factors such as the width of the fire, which is shown to have an influence.

Récemment, des résultats très intéressants ont été obtenus à partir d'essais d'incendie réalisés sur maquettes [95] ou en vraie grandeur au Memorial tunnel [22]. Ils montrent qu'au-delà d'un certain seuil de puissance thermique (dépendant probablement de la section transversale et de la déclivité du tunnel), la vitesse critique dépend moins de la puissance que dans l'équation mentionnée ci-avant.

Tous ces résultats tendent à montrer que pour une puissance ne dépassant pas 100 MW et une pente inférieure à 4 %, une vitesse de l'air de 3 m/s est suffisante pour empêcher la remontée de fumée.

Le dimensionnement et l'exploitation des systèmes de ventilation doivent tenir compte du fait que, en raison de la présence du courant d'air longitudinal, la zone en aval de l'incendie est exposée aux fumées et aux gaz de combustion, avec un danger de suffocation ou de brûlure si les usagers du tunnel se trouvent à cet endroit. Toute mesure destinée à faciliter la fuite des usagers de la zone dangereuse (en aval ou dans la zone d'incendie) doit être prise. Pour cette raison, les recommandations formulées ici tiennent compte des cas suivants.

A) Tunnel unidirectionnel, non conçu pour les embouteillages (zone non urbaine)

Dans ce cas, la conception de la ventilation doit tenir compte de ce que les usagers en aval de l'incendie pourront fuir avec leur propre véhicule alors que ceux qui se trouvent en amont ne le pourront pas. Les tunnels situés dans les zones non urbaines ne sont généralement pas sujets à de fréquentes situations de congestion. Leur système de ventilation n'est donc pratiquement jamais conçu dans cette optique. Les tunnels non urbains, qui sont fréquemment congestionnés, doivent eux être dimensionnés en fonction des embouteillages (voir paragraphe suivant). Un incendie provoqué par un véhicule impliqué dans un accident avec d'autres véhicules bloqués en aval est possible, mais sa probabilité est faible (voir chapitre II). Ce cas n'est pratiquement jamais pris en compte lors du dimensionnement. Si nécessaire, le risque d'un tel événement peut être réduit par une détection automatique d'incident et par un système de contrôle de la circulation (voir chapitre VI).

B) Tunnel unidirectionnel, conçu pour les embouteillages (zone urbaine)

La conception de la ventilation doit tenir compte des personnes dans l'incapacité de fuir avec leur véhicule qui se tiendront vraisemblablement de chaque côté de l'incendie. Dans les zones urbaines, il est courant de trouver des situations de bouchon ou de circulation saccadée ; ce cas s'applique donc généralement aux tunnels urbains suffisamment longs.

C) Tunnel bidirectionnel

Dans le cas d'un tunnel circulé dans les deux sens, il faut penser que, en cas d'incendie, des personnes ne pouvant fuir avec leur véhicule se trouveront généralement situées de part et d'autre de l'incendie.

Recently very interesting results have also been obtained from fire tests performed in scale models [95] or in full size in the Memorial Tunnel [22]. These show that above a given level of heat release (probably depending on tunnel cross-section and slope) the critical velocity depends less on heat release rate than in the above equation.

All these results tend to show that for a heat release rate not exceeding 100 MW and a slope lower than 4%, an airflow velocity of 3 m/s is sufficient to prevent backlayering.

The design of the ventilation system and its operation must take into consideration that, due to the presence of the longitudinal airflow, the zone downstream of the fire is exposed to smoke and hot combustion gases with the danger of suffocation or burning if tunnel users are in this zone. Any possible design measure aiming at a safe fleeing of users from the dangerous section (fire area or downstream) must be taken. For this reason the present recommendations take into consideration the following cases:

A) Tunnel with one-way traffic not designed for queues (non-urban area)

The ventilation design, in this case, can assume that drivers downstream of the fire are free to escape by their own cars whilst drivers upstream will not. Tunnels located in non-urban areas are generally not liable to frequent congestion situations. Therefore the relevant ventilation

systems are generally not designed for queues. Non-urban tunnels which are frequently congested have instead to be designed for queues (see following paragraph). The event of a fire ignited by vehicles involved in a secondary accident in the presence of others vehicles trapped downstream is possible, but the relevant probability is low (see section II); this case is nearly never taken

into account in the design phase. If necessary the risk of such an

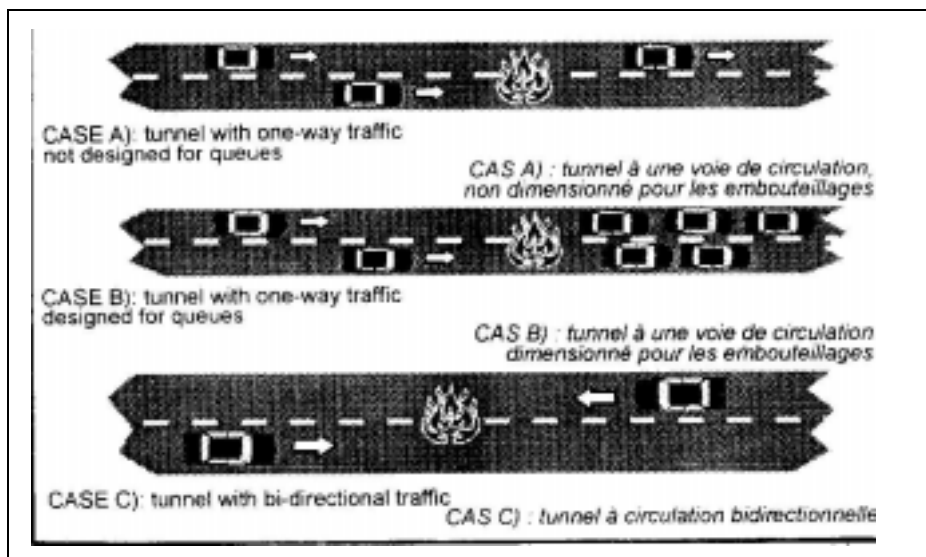


Figure 5.7.2 - Design assumption

Figure 5.7.2 - Hypothèses de circulation à étudier

occurrence can be reduced by an automatic incident detection and a traffic control system (see section VI).

B) Tunnel with one-way traffic designed for queues (urban area)

The ventilation design must take into consideration that people prevented from escaping with their own vehicles can likely stand on both sides of the fire. In urban areas it is quite usual to find stop and go traffic situation, therefore this case applies generally to urban tunnels of sufficient length.

C) Tunnel with two-way traffic

In case of tunnels used by vehicles running in both directions, it must be taken into consideration that, in the event of fire, people prevented from escaping with their own vehicles will generally be located on both sides of the fire.

V.7.2 Limites d'application et critères de dimensionnement de la ventilation longitudinale

En fonction de la taille de l'incendie de dimensionnement (voir chapitre II), le courant d'air doit être dimensionné de façon à exercer un contrôle suffisant de la fumée. La capacité des accélérateurs nécessaire en exploitation normale peut ne pas suffire pour remplir les conditions de maîtrise des fumées ; il est donc recommandé de dimensionner la puissance de ventilation afin de contrôler les fumées chaudes conformément aux paragraphes suivants.

Le niveau de risque à l'intérieur d'un tunnel, et donc la taille de l'incendie de dimensionnement, dépendent du type de circulation autorisé ; les différents cas sont (voir chapitre II.4) :

- véhicules particuliers autorisés seulement,
- véhicules particuliers et camions - sans marchandises dangereuses- autorisés,
- camions avec marchandises dangereuses autorisés.

Limites d'utilisation de la ventilation longitudinale

De nombreux pays n'appliquent pas de normes limitant l'usage de la ventilation longitudinale. Cependant, toutes les normes existantes mettent en avant que les tunnels bidirectionnels doivent avoir des limites plus sévères que les tunnels unidirectionnels. Des commentaires sur quelques normes nationales sont présentés ci-après.

Autriche

Il n'y a pas de limitation générale quant à l'utilisation de la ventilation longitudinale. La décision s'appuie sur une analyse des risques qui prend en compte l'exploitation normale et les situations d'incendie. Les principaux facteurs de cette analyse sont l'interdistance des issues de secours et le danger potentiel du tunnel. Si la ventilation longitudinale est utilisée avec une circulation bidirectionnelle, les équipements suivants sont ajoutés pour la régulation et l'exploitation de la ventilation : contrôle de la direction et de la vitesse du courant d'air, détection incendie, circuit de télévision.

Allemagne

La ventilation longitudinale par accélérateurs est applicable pour les tunnels jusqu'à 2 km de long si la circulation est bidirectionnelle (dans ce cas, certains équipements et issues de secours sont obligatoires). Dans le cas d'une circulation unidirectionnelle, la ventilation longitudinale peut être utilisée jusqu'à 4 km.

France

Pour les tunnels bidirectionnels non urbains, la ventilation longitudinale est autorisée jusqu'aux longueurs suivantes :

- généralement 800 m,
- 1 000 m si circulation $\leq 2\ 000$ véh/jour par sens.

Pour les tunnels bidirectionnels urbains, la ventilation longitudinale est toujours interdite.

V.7.2 Limits of application and design criteria of longitudinal ventilation

Depending on the design fire size (see section II), the airflow must be designed to achieve a sufficient control of the smoke. The jet fan capacity required by normal operation may not be sufficient to fulfil the requirements of smoke handling; it is therefore recommended to design the ventilation power in order to control the hot smoke according to the following paragraph.

The level of risk within a tunnel, and therefore the design fire size, depend on the type of traffic allowed; the relevant cases (see II.4) are:

- passenger cars allowed only,
- passenger cars and trucks allowed, only without dangerous goods,
- trucks with dangerous goods allowed

Limitation in the use of longitudinal ventilation

Many countries have no standard which restricts the use of the longitudinal ventilation. However, all existing standards point out that two-way tunnels should have a stronger limitation than one-way tunnels. comments on some national standards are reported hereafter.

Austria

There is no general limitation in the use of longitudinal ventilation. The decision is based on a risk analysis which takes into account normal operation and fire situations. The main factors for the analysis are the distance between emergency exits and the potential danger of the tunnel. If longitudinal ventilation is used with two-way traffic, the following additional equipment is implemented for the regulation and operation of ventilation: monitoring of the direction and velocity of the airflow, fire detection, CCTV.

Germany

Longitudinal ventilation by jet fans is applicable to tunnels up to 2 km if the traffic is bi-directional (in this case a certain set of equipment and safety exits are required). In case of one-way traffic, longitudinal ventilation can be applied up to 4 km.

France

For two-way tunnels in non-urban areas, longitudinal ventilation is authorised up to the following lengths:

- 800 m generally
- 1000 m if traffic \leq 2000 veh/day per direction.

For two-way tunnels in urban areas, longitudinal ventilation is always forbidden.

Pour les tunnels unidirectionnels, la ventilation longitudinale est autorisée jusqu'aux longueurs suivantes :

- zone non urbaine : 4 000 m
- zone urbaine : 800 m

La longueur limite pour les tunnels unidirectionnels peut être dépassée si une extraction massive est prévue tous les 4 000 m dans les tunnels non urbains et tous les 800 m dans les tunnels urbains.

États-Unis

Auparavant, aucun tunnel n'était ventilé longitudinalement aux États-Unis. Actuellement, cette méthode est utilisée pour des tunnels inférieurs à 900 m.

Recommandations

Généralement, on s'accorde pour considérer que les systèmes de ventilation longitudinale doivent être utilisés dans les conditions suivantes :

A) Tunnel unidirectionnel, non conçu pour les embouteillages (zone non urbaine)

La ventilation longitudinale peut toujours être utilisée, à condition que les véhicules circulant en aval de l'incendie puissent sortir du tunnel et que les véhicules bloqués en amont se trouvent dans le courant d'air frais de la ventilation longitudinale.

B) Tunnel unidirectionnel, conçu pour les embouteillages (zone urbaine)

Lorsque le tunnel est situé en zone urbaine et/ou lorsqu'il est souvent embouteillé, le concepteur de la ventilation doit prévoir que des usagers peuvent se trouver des deux côtés de l'incendie ; ce cas nécessite le même type d'analyse, dans la phase de conception, qu'un tunnel bidirectionnel (voir le paragraphe suivant). L'exploitation peut cependant être différente, tout spécialement parce que la circulation n'est pas toujours congestionnée et qu'elle n'est presque jamais totalement arrêtée.

C) Tunnel bidirectionnel

La ventilation longitudinale peut être utilisée dans les tunnels bidirectionnels, si une analyse montre que le risque est compatible avec les normes nationales de sécurité. L'analyse du risque doit prendre en compte tous les facteurs de dimensionnement et les conditions limites, et au moins :

- le volume de circulation,
- le type de trafic autorisé,
- la géométrie du tunnel,
- les facteurs de risques admis au niveau national.

For one-way tunnels, longitudinal ventilation is authorised up to the following lengths:

- non-urban area: 4000 m
- urban area: 800 m

The length limit for one-way tunnels can be overcome if massive extraction is provided at such distances (every 4000 m in non-urban tunnels and every 800 m in urban tunnels).

USA

In the past there was no tunnel longitudinally ventilated in the USA. Nowadays the application of this method is used with tunnels up to 900 m.

Recommendations

It is generally agreed that longitudinal ventilation systems should be used under the following conditions:

A) Tunnel with one-way traffic not designed for queues (non-urban area)

Longitudinal ventilation is always applicable under the assumption that the traffic downstream of the fire site can leave the tunnel and the stopped traffic upstream is in the fresh air stream of the longitudinal ventilation.

B) Tunnel with one-way traffic designed for queues (urban area)

When the tunnel is located in an urban area and/or when the tunnel is daily (or frequently) congested, the ventilation designer must assume that people can be on both sides of the fire; this case needs the same kind of analysis, in the design phase, as a bi-directional tunnel (see following paragraph). The operation can, however, be different, especially because the traffic is not always congested, and is hardly ever at a complete standstill.

C) Tunnel with two-way traffic

Longitudinal ventilation can be used in two-way tunnels, only if a suitable analysis shows that the risk is acceptable when compared with national safety standards. The risk analysis has to take into consideration all design factors and boundary conditions, but at least:

- design volume of traffic,
- type of traffic allowed,
- geometry of the tunnel,
- admissible national risk factors.

Vitesse longitudinale de dimensionnement

Le système de ventilation doit pouvoir produire une vitesse minimale de l'air pour pousser les fumées dans une direction (afin d'éviter la remontée de la fumée) durant la phase d'évacuation et de lutte contre l'incendie, et d'éliminer le risque d'explosion (en assurant une combustion totale). Cette vitesse minimale de l'air dépendra du type de trafic admis dans le tunnel.

En 1987 [19], l'AIPCR mentionnait les vitesses de l'air suivantes pour refouler toutes les fumées d'un côté de l'incendie : 1 à 2 m/s pour un incendie de véhicule particulier, 2 à 3 m/s pour un incendie d'autobus ou de camion, 5 à 8 m/s pour un incendie de camion citerne. Il était recommandé que le système de ventilation puisse créer une vitesse longitudinale de l'air comprise entre 3 et 6 m/s , cette valeur dépendant de la taille de l'incendie.

Le tableau 5.7.1 montre les vitesses de dimensionnement récemment recommandées par quelques pays à la suite de nouvelles études.

Tableau 5.7.1 - Exemples de vitesse longitudinale utilisée dans différents pays

| Type de trafic | Incendie (MW) | Vitesse de dimensionnement de l'air [m/s] | | |
|------------------------|---------------|---|----------|---|
| | | France | Pays-Bas | Suède |
| véhicules particuliers | 2,5 - 8 | 2 | - | pas de règles générales (voir ci-après) |
| autobus et camions | <100 | 3 | 3 | |
| camions citernes | >100 | 4 | 5 | |

En Suède, il n'existe pas de règles générales relatives à la vitesse de l'air en cas d'incendie. Pour le boulevard périphérique de Stockholm, l'incendie de dimensionnement est de 100 MW et la vitesse correspondante de dimensionnement de l'air est fixée à 3 m/s. Le transport de liquides inflammables qui s'enflamment plus facilement que le gasole est limité dans ces tunnels.

Recommandations

Durant l'incendie de dimensionnement, le système de ventilation doit pouvoir produire une vitesse longitudinale de l'air suffisante pour pousser toutes les fumées dans une direction (le sens de circulation dans le cas d'un tunnel unidirectionnel).

Une vitesse de dimensionnement de l'air de 3 m/s est recommandée pour tous les incendies qui n'impliquent pas de poids lourds transportant des marchandises dangereuses très inflammables.

Il n'est pas possible aujourd'hui de donner des recommandations précises en ce qui concerne les incendies de camions citernes. Ceux-ci peuvent produire une puissance thermique de plusieurs centaines de mégawatts. Les vitesses de l'air recommandées par quelques pays et mentionnées ci-avant peuvent être utilisées comme références.

Design longitudinal velocity

The ventilation system must be able to produce a minimum air velocity in order to push all the smoke in one direction (preventing the backlayering of the smoke) during the evacuation and fire fighting phase, and to avoid a danger of explosion (ensuring complete combustion). This minimum air velocity will depend on the traffic allowed within the tunnel.

In 1987 [19], PIARC mentioned the following air velocities to push all smoke to one side of the fire: 1-2 m/s for a passenger car fire, 2-3 m/s for a bus or a truck, 5-8 m/s for a petrol tanker. It recommended that the ventilation system should be able to create a longitudinal air velocity between 3-6 m/s, the value depending on the assumed size of the fire.

Table 5.7.1 shows the design velocities more recently recommended by several countries further to new research results.

Table 5.7.1 - Examples of longitudinal velocity used in different countries

| Type of traffic | Fire (MW) | Air design speed [m/s] | | |
|---------------------|-----------|------------------------|-------------|---------------------------------|
| | | France | Netherlands | Sweden |
| Passenger cars only | 2.5 - 8 | 2 | - | No general rules (see below) |
| Buses and trucks | <100 | 3 | 3 | |
| Petrol tanker | >100 | 4 | 5 | |

In Sweden, there are no general rules concerning air velocity in case of fire. For the Stockholm Ring Road the design fire is 100 MW and the corresponding air design velocity is set to 3 m/s. Transports of flammable liquids that are ignited more easily than diesel oil are restricted in these tunnels.

Recommendations

During the design fire, the ventilation system must be able to produce a longitudinal airflow velocity sufficient to push all smoke to one direction (the direction of traffic in the case of a one-way tube).

A design airflow velocity of 3 m/s is recommended for all fires which do not involve a heavy goods vehicle carrying very flammable dangerous goods.

It is not possible at present to give precise recommendations for the case of a petrol tanker fire which can produce a heat release rate of several hundreds megawatts. The above-mentioned design velocities recommended by several countries can be used as a reference.

Hypothèses de dimensionnement

La vitesse longitudinale de dimensionnement doit être obtenue selon les hypothèses énoncées ci-après :

- *paramètres météorologiques* : les paramètres météorologiques ont une influence certaine sur la performance des systèmes de ventilation, tout particulièrement longitudinale. Le système de ventilation doit avoir une capacité suffisante pour produire la vitesse de l'air requise, en dépit d'une pression fixée du vent. La différence de pression peut être évaluée en utilisant l'équation simplifiée de Bernoulli suivante :

$$\Delta p = k \frac{1}{2} \rho w^2$$

où Δp représente la pression induite par le vent, ρ la densité de l'air, w la vitesse du vent, k un paramètre de dimensionnement qui dépend de la configuration des têtes.

L'orientation des deux têtes du tunnel, en ce qui concerne les vents dominants, est un paramètre très important ; en effet, la résistance effective du vent (ou poussée) est une fonction de l'angle entre la direction du vent et la direction du courant d'air entrant ou sortant du tunnel.

- *trafic arrêté* : en évaluant la poussée nécessaire en cas d'incendie, il faut envisager qu'un certain nombre de véhicules peuvent être bloqués dans le tunnel et que leur présence réduira l'efficacité de la ventilation. Le nombre de véhicules bloqués peut être évalué selon la composition du trafic (pourcentage de véhicules particuliers et de poids lourds), le niveau et l'efficacité du système d'exploitation routière et de contrôle du trafic utilisé dans le tunnel.
- *effets de l'incendie sur le courant d'air* : plusieurs aspects doivent être pris en compte :
 - en cas d'incendie important, les hautes températures induisent un accroissement du volume d'air et, par conséquent, de sa vitesse, et provoquent ainsi des pertes de charge croissantes par frottement de l'air ; la densité, en effet, baisse, la vitesse de frottement augmente et, au global, la perte de charge totale augmente localement ;
 - l'effet de blocage de l'incendie sur le courant d'air longitudinal produit une perte de charge localisée supplémentaire ;
 - selon la déclivité du tunnel, l'effet cheminée peut atteindre des valeurs notables ;
 - la diminution de la densité de l'air conduit à une baisse de la poussée des accélérateurs qui travaillent dans l'air chaud.

Design hypotheses

The design longitudinal velocity must be obtained under the hypotheses discussed below:

- *Meteorological parameters:* meteorological parameters have an appreciable influence on the performance of the ventilation systems, especially longitudinal. The ventilation system must have a sufficient capacity to produce the required air velocity against a stated wind pressure. The difference of pressure can be evaluated using the following simplified equation of Bernoulli:

$$\Delta p = k \frac{1}{2} \rho w^2$$

where Δp represents the pressure induced by wind, ρ the air density, w the wind speed, k a design parameter which depends on the configuration of the portals.

The orientation of both tunnel portals with respect to the prevailing winds is a very significant parameter; in fact the effective wind resistance (or thrust) is a function of the angle between the direction of the wind and the direction of the air flow entering/exiting the tunnel.

- *Standstill traffic:* while evaluating the necessary thrust in case of fire, it must be assumed that a certain number of vehicles can be trapped in the tunnel and their presence reduces the performance of the ventilation system. The number of vehicles trapped can be assessed according to the design mix of traffic (% of passenger cars and heavy vehicles), the level and the performance of the current road operation and traffic control system available for the tunnel.
- *Effects of fire on the air flow:* several aspects must be taken into account:
 - in the event of a big fire, the high temperature induces an increase of air volume and therefore of air speed, as a result of which the air friction losses increase. The density, in fact, decreases, the friction velocity increases and, on balance, the overall local losses increase;
 - the blockage effect of the fire on the longitudinal airflow produces a supplementary local head loss;
 - according to the grade of the tunnel, the chimney effect can raise to appreciable values;
 - the decrease of air density results in the lowering of the driving force of the boosters that work in the hot air.

Réversibilité du système

La réversibilité du système peut être utile dans plusieurs situations durant la phase de lutte contre l'incendie, spécialement si le tunnel possède des accès de secours en plus des deux têtes.

Lorsque l'on prévoit la réversibilité, il faut tenir compte du fait qu'une telle opération peut prendre du temps (jusqu'à 10 mn), selon le système de ventilation, la géométrie du tunnel, le type d'accélérateurs utilisés et d'autres conditions limites. Par ailleurs, il faut observer que les accélérateurs n'ont pas toujours la même poussée en direction inverse. Par exemple, il existe des accélérateurs spécialement conçus pour une direction ; leur poussée dans la direction inverse peut être inférieure de 50 % à leur poussée nominale.

Dans le cas de tunnels bitubes, l'inversion du courant d'air dans le tunnel intact peut empêcher la recirculation des fumées évacuées par la tête de l'autre tube. Une telle recirculation de la fumée peut également être évitée par des travaux de génie civil (décalage entre les deux têtes, mur de protection entre les têtes, etc.).

Communications entre tubes parallèles

Dans le cas de tunnels bitubes, il est relativement facile de construire des communications faisant office de sorties de secours. Toutes ces communications doivent être fermées par des portes, si possible faisant office de sas, afin d'empêcher la fumée de parvenir dans le tube intact. Les portes ne peuvent être supprimées que si la surpression du tube intact est garantie dans tout scénario d'exploitation, mais ce système n'est en principe pas recommandé : il est en effet peu fiable si des accélérateurs tombent en panne. Pour plus de détails sur les communications entre tubes, voir le chapitre VI.

V.7.3 Exigences en matière d'équipement

Le système de ventilation doit être conçu afin de répondre aux besoins énoncés ci-avant en cas d'incendie. Pour la conception et le choix de tout équipement, il faut tenir compte de ce que les fumées chaudes, qui traversent tout le tunnel, peuvent endommager très sérieusement les installations (surtout si le tunnel possède une isolation thermique).

Les câbles, les boîtes de jonction et toutes les autres parties non protégées du système de ventilation doivent présenter la même résistance au feu que les accélérateurs (pour plus de détails sur la résistance au feu des équipements, se reporter au chapitre VII).

Résistance au feu des accélérateurs

Différents points doivent être considérés pour permettre le bon fonctionnement des accélérateurs durant un incendie :

- la résistance d'une pale en aluminium chute rapidement à haute température ; cela dépend du type d'alliage utilisé ; lorsque de fortes températures de l'air ne peuvent être évitées, il faut choisir des pales en acier ;

Reversibility of the system

The reversibility of the system can be helpful in several situations during the fire fighting phase, especially if the tunnel has emergency accesses other than the two portals.

When planning the reversing of the air, it must be taken into consideration that such operation can take a long time (up to 10 minutes), depending on the ventilation system, the tunnel geometry, the fans used and other boundary conditions. Besides it should be observed that fans do not give the same thrust in the reversed direction. For instance there are jet fans specially designed for one direction, whose thrust in the reversed direction may be lower than 50% of the nominal one.

In the case of twin tunnels the reversing of the flow in the unharmed tunnel can prevent the circulation of smokes evacuated through the portal of the twin tunnel. Such circulation of smoke can also be prevented by civil engineering works (distance between the twin portals, protection walls between portals, etc.).

By-pass in twin tunnel

In the case of twin tunnels, it is relatively easy to build cross-connections working as escape routes. All cross-connections have to be closed by doors, if possible with a lock chamber, in order to prevent the circulation of smoke to the unharmed tube. The doors can be dropped only if the over-pressure of the unharmed tube is guaranteed in any operational scenario, but it is generally not recommended because such a system is less reliable if fan breakdowns occur. For other details on by-passes see section VI.

V.7.3 Requirements on equipment

The ventilation system has to be designed in order to meet the previous requirements in case of fire. For the design and choice of all equipment it has to be taken into account that the hot smoke, travelling over the whole tunnel length, can seriously affect the installations (especially if the tunnel has a thermal insulation).

Cables, junction boxes and all other non-protected parts of the ventilation system should have the same fire resistance as fans (for more details on fire resistance of other equipment, see section VII).

Fire resistance of fans

Different points must be considered to permit the running of jet fans during a fire:

- the strength of a normal aluminium blade falls quickly at high temperatures. It depends on the type of alloy. When high air temperatures cannot be avoided, steel blades have to be chosen;

- sous températures élevées, les pales se dilatent en longueur plus rapidement que le carter ; les pales tendent alors à bloquer la rotation ; on peut soit utiliser des extrémités de pales en matériau abrasif, soit ménager un plus grand espace entre les pales et le carter ;
- un moteur d'accélérateur doit être refroidi par l'air extérieur pour répondre aux exigences de refroidissement ; cependant, certains moteurs suffisamment résistants peuvent fonctionner sans refroidissement extérieur ;
- tous les équipements auxiliaires, de même que le câblage des accélérateurs, doivent également remplir certaines exigences quant aux températures.

Pour toutes ces raisons, les ventilateurs doivent être conçus et construits afin de résister à de fortes températures ; de nombreuses normes nationales existent pour la résistance au feu des accélérateurs, de 250 °C pour 1h (Autriche, États-Unis, Pays-Bas, Royaume-Uni), 250 °C pour 1h30 (France), 300 °C pour 1 h (Norvège, Suède), 400 °C pour 1h30 (France, Suisse).

Répartition des accélérateurs

Comme indiqué plus haut, la méthode d'installation la moins coûteuse consiste à regrouper les accélérateurs près des têtes. De cette façon, la longueur des câbles est la plus courte possible.

Si un incendie se déclare au voisinage d'une tête, et si les accélérateurs ont été regroupés à cet endroit, une batterie complète d'accélérateurs peut être mise hors service. Si la puissance mécanique d'un seul groupe d'accélérateurs est suffisante pour contrôler la fumée durant l'évacuation et la lutte contre l'incendie, cette conception peut être adoptée ; sinon, il est recommandé de répartir les ventilateurs en plusieurs batteries tout le long du tunnel.

Dans le cas d'une distribution des accélérateurs tout le long du tunnel, il est recommandé que leur nombre soit légèrement surabondant ; cela peut éviter l'utilisation d'accélérateurs résistant au feu. En effet, en cas d'incendie, la température décroît rapidement dès que la distance à partir du foyer augmente et il peut être plus économique d'admettre la destruction de quelques appareils plutôt que de tous les protéger. Le tableau 5.7.2 donne quelques exemples de certains pays.

Tableau 5.7.2 - Directives sur la résistance au feu des accélérateurs dans certains pays

| Pays | Résistance au feu des accélérateurs | | Destruction de tous les accélérateurs sur une distance de : | |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------|---|-------------------------------|
| | Température | Durée de résistance | sans marchandises dangereuses | avec marchandises dangereuses |
| France Tunnel > 500 m | 400 °C | 1h30 | 70 m | 200 m |
| | 250 °C | 1h30 | 100 m | 400 m |
| | aucune protection | | 500 m | (interdit) |
| Pays nordiques [90] | 250 °C | 1 h | 150 - 300 m en aval de l'incendie | |
| Pays-Bas | Voir annexe | | | |

- the length of the blades grows quicker than the housing enlarges due to high temperatures. The blade tips tend to block the rotation. Abrasive tips may be introduced or a larger distance between blades and housing provided;
- a normal fan motor has to be cooled by outside air to meet the cooling requirements. However, there are motors available which have a very high resistance without external cooling;
- all the auxiliary equipment as well as the wiring of the fan have to meet the air temperatures also.

For these reasons, fans must be designed and built in order to withstand high temperatures; there are several national standards for the heat resistance of fans ranging from 250 °C for 1 hour (Austria, Netherlands, United Kingdom, USA), 250 °C for 1.5 hours (France), 300 °C for 1 hour (Norway, Sweden), 400 °C for 1.5 hours (France, Switzerland).

Fans distribution

As mentioned above, the cheapest criterion for the installation is the concentration of fans near portals. In this way the length of cables is in fact the shortest possible.

Should the fire take place in the portal area, and adopting the above-reported fan distribution, a full set of fans may be put out of order. If the mechanical power of a single group of fans is sufficient to control the smoke during the evacuation and fire-fighting phases the above criterion can be adopted, otherwise it is recommended to divide fans in several sets that will be distributed all along the tunnel.

In case of fans distribution all along the tunnel, a limited fan redundancy is recommended and can avoid the use of fireproof fans: in fact in case of fire the temperature decreases rapidly when the distance from the fire spot increases, and it may be cost-effective to envisage the destruction of a few machines rather than protecting all the fans. Table 5.7.2 gives some examples in different countries.

Table 5.7.2 - Guidelines on fire-proofing of jet fans in some countries

| Country | Fireproofing of jet fans | | Destruction of all jet fans on the following distance | |
|--------------------------|--------------------------|-----------|---|----------------------|
| | Temperature | Endurance | without dangerous goods | with dangerous goods |
| France Tunnel > 500 m | 400 °C | 1.5 h | 70 m | 200 m |
| | 250 °C | 1.5 h | 100 m | 400 m |
| | no protection | | 500 m | (forbidden) |
| Nordic countries [90] | 250 °C | 1 h | 150 - 300 m downstream of fire | |
| Netherlands | See appendix | | | |

V.7.4 Directives sur la commande de la ventilation longitudinale

V.7.4.1 Définitions et critères généraux

Le régime de ventilation peut être activé par un système de détection automatique des incendies ou bien par un opérateur qui reçoit les alertes et les vérifie (par exemple à l'aide de systèmes de caméra vidéo). Dans tous les cas, la commande manuelle du système de ventilation (par le personnel du tunnel ou les pompiers) doit être possible localement et/ou à partir du centre de contrôle du tunnel (s'il existe).

L'exploitation du tunnel en cas d'incendie, depuis la mise à feu jusqu'à l'extinction, peut être décrite par les quatre phases suivantes (qui, généralement, se recouvrent) :

1. phase d'allumage : cette phase commence par l'allumage de l'incendie et comprend à la fois la détection (manuelle ou automatique) et l'intervention correspondante sur le régime de ventilation.
2. première phase d'évacuation (évacuation individuelle) : pendant cette phase, les usagers fuient par leurs propres moyens et les pompiers ne sont pas encore arrivés sur place.
3. seconde phase d'évacuation (évacuation assistée) : durant cette phase, les pompiers aident les blessés ou les personnes handicapées à s'échapper.
4. lutte contre l'incendie : pendant cette phase, la responsabilité de l'exploitation est, généralement, déjà passée de l'exploitant du tunnel aux pompiers ; ceux-ci ont déjà vérifié que tous les usagers ont pu évacuer la zone de l'incendie (ou ont déjà été secourus : tous sont à l'extérieur du tunnel, en amont de l'incendie ou dans un autre lieu sûr).

La ventilation durant une phase d'évacuation doit assurer des conditions optimales pour les personnes en fuite dans le tunnel.

Lorsque la phase d'évacuation est terminée, la lutte contre l'incendie doit être facilitée par une gestion appropriée des fumées. La condition de base est qu'il reste un accès libre de toute fumée d'un côté de l'incendie. De préférence, la direction du flux de fumée ne doit pas être modifiée par rapport à la situation qui régnait pendant l'évacuation. Dans tous les cas, à l'arrivée des pompiers, on peut décider sur place de la meilleure commande des accélérateurs qui doit être utilisée pour faciliter la lutte contre l'incendie.

V.7.4.2 Recommandations sur l'exploitation de la ventilation

Les recommandations de cette section s'appliquent à tous les tunnels existants, et donc aussi aux tunnels qui ne sont pas conçus selon les recommandations du paragraphe V.7.2.

V.7.4 Guidelines on control of longitudinal ventilation

V.7.4.1 Definitions and general criteria

The ventilation regime can be activated by an automatic fire detection system or by an operator who receives the alarms and verifies them (e.g. through video camera systems). In any case, the manual operation of the ventilation system (by tunnel personnel or fire brigade) should be provided locally and/or from the tunnel control centre (when existing).

The tunnel operation in case of fire, since the ignition to the extinction, can be characterised using the following four phases (that generally overlap):

1. ignition phase: this phase starts with the ignition of the fire and includes both the detection (manual or automatic) and the consequent intervention on the ventilation regime;
2. evacuation phase 1 (self rescuing): during this phase the users are escaping from the fire area and the fire brigade is not yet on the spot;
3. evacuation phase 2 (assisted): during this phase the fire brigade assists injured or handicapped users to escape from the fire area;
4. fire-fighting: during this phase the control of operation is (generally) already passed from the tunnel operator to the fire brigade; the fire brigade has already checked that all users have already escaped (or have already been rescued) from the fire area (all of them are out of the tunnel, upstream of the fire or in other safe places).

The ventilation action during an evacuation phase must be such that optimal conditions for the fleeing person in the tunnel are established.

When the evacuation phase is concluded, fire fighting must be facilitated by proper smoke handling. A basic requirement is a smoke free access to the fire from one side. Preferably the direction of smoke flow should not be changed from the situation during evacuation. In any case, upon the arrival of the fire-fighting brigade, it can be decided on site which better fan control should be used to facilitate fire fighting.

V.7.4.2 Recommendations on the operation of ventilation

The recommendations of this paragraph apply to all existing tunnels, therefore also to tunnels that are not designed according to the recommendations of § V.7.2.

L'inversion des accélérateurs n'est généralement pas recommandée durant la phase d'évacuation, même si l'incendie est situé près de la tête d'entrée. Pendant le délai entre la mise à feu de l'incendie et l'inversion des accélérateurs, la fumée peut avoir déjà couvert plusieurs centaines de mètres. Si l'écoulement de la couche de fumée est inversé, elle se répandra dans toute la section transversale alors que, durant la phase d'évacuation des usagers, il est très important de maintenir de bonnes conditions de visibilité.

Ainsi une inversion de la direction de l'air est seulement possible lorsque tous les usagers sont sortis du tunnel. L'inversion peut être utilisée en cas d'embouteillage, mais elle doit être décidée par l'homme et ne doit, en aucun cas, être déclenchée automatiquement.

Le tableau suivant décrit les recommandations en matière d'exploitation de la ventilation en cas d'incendie :

| Ventilation longitudinale | Phases d'évacuation | Phase de lutte contre l'incendie |
|--|--|---|
| Un tube avec circulation bidirectionnelle | La stratification de la fumée ne doit pas être perturbée : - vitesse longitudinale de l'air relativement faible, - aucun accélérateur en fonctionnement dans la zone enfumée. | La remontée de la fumée doit être évitée : - vitesse longitudinale plus élevée, - direction du courant d'air adaptable. |
| Deux tubes avec circulation unidirectionnelle | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Circulation fluide normale</u> : La remontée de la fumée doit être évitée : vitesse longitudinale de l'air suffisante dans la même direction que la circulation. • <u>Circulation congestionnée, ou incendie en fin d'embouteillage derrière un accident, ou un tube utilisé de façon bidirectionnelle</u> : Identique à un tube avec circulation bidirectionnelle pour les deux phases. | |

V.8 Recommandations sur la ventilation transversale et semi-transversale

V.8.1 Objectifs du désenfumage en ventilation transversale et semi-transversale

Le but du contrôle de la propagation de la fumée est de maintenir les usagers le plus longtemps possible dans un espace libre de toute fumée dans l'espace de circulation. Cela signifie que la stratification de la fumée doit être maintenue, en conservant une couche d'air plus ou moins claire et respirable sous la couche de fumée. La fumée stratifiée est extraite du tunnel par des ouvertures situées au plafond ou en haut des piédroits.

V.8.2 Extraction de la fumée

Il est essentiel que toutes les gaines d'amenée d'air et d'extraction des fumées soient très étanches.

The reversal of jet fans is generally not recommended during the evacuation phase, even if the fire is located near the entrance portal. In the period between the ignition of the fire and the reversal of the jet fans, the smoke can have travelled several hundreds metres already. When the smoke layer flow is reversed, it will be spread over the whole cross section whilst during the phases of people evacuation it is important to maintain good visibility conditions.

So a possible reversal of the air flow direction should only take place when all people are out of the tunnel. The reversing can be evaluated in the case of traffic jam inside the tunnel, but it must be a human choice, not an automatic configuration.

The following table sums up the recommended ventilation operation in case of fire:

| Longitudinal ventilation | Evacuation phases | Fire-fighting phase |
|---------------------------------------|---|--|
| One tube with two-way traffic | The smoke stratification must not be disturbed: - longitudinal air velocity quite small - no jet fans working in smoke zone | Avoid backlayering of smoke: - higher longitudinal velocity - direction of airflow adaptable |
| Two tubes with one-way traffic | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Normal fluid traffic:</u> Avoid backlayering of smoke: sufficient longitudinal air velocity in the same direction as traffic flow • <u>Congested traffic, or fire at the end of the queue behind an accident, or one tube used bi-directionally:</u> Same as one tube with bi-directional traffic for the two phases. | |

V.8 Recommendations on transverse and semi-transverse ventilation

V.8.1 Objectives of smoke control with transverse and semi-transverse ventilation

The purpose of controlling the spread of smoke is to keep people as long as possible in a smoke-free part of the traffic room. This means that the smoke stratification must be kept intact, leaving more or less clear and breathable air underneath the smoke layer. The stratified smoke is taken out of the tunnel through exhaust openings located in the ceiling or at the top of the sidewalls.

V.8.2 Smoke extraction

First it is important to indicate that all supply air ducts and all extraction smoke ducts must be very tight.

Pour extraire une couche de fumée stratifiée de l'espace de circulation sans perturber la stratification, une méthode efficace est l'extraction continue par une gaine d'évacuation de l'air. Cependant, les conditions suivantes doivent être remplies :

- La vitesse longitudinale de l'air doit être inférieure à 2 m/s dans le tunnel, selon les observations faites lors des essais japonais en vraie grandeur. A des vitesses plus grandes, la turbulence verticale à l'interface entre la fumée et l'air frais refroidit rapidement la couche supérieure et la fumée se mélange dans toute la section transversale.
- Avec des vitesses longitudinales de l'air proches de zéro, la couche de fumée se répand des deux côtés de l'incendie. La fumée se propage sous forme stratifiée pendant une durée qui peut aller jusqu'à 10 mn, même sans extraction. Après cette première phase, la fumée commence à se mélanger dans toute la section transversale à moins que, à ce moment, le système d'extraction soit complètement opérationnel.

Avec une vitesse de l'air d'environ 2 m/s, la plupart des fumées d'un incendie de taille moyenne se répandent d'un côté de l'incendie (faible remontée de fumée) et commencent à se mélanger dans la section transversale à une distance de 400 à 600 m en aval du foyer. Ce mélange dans la section transversale peut être évité si l'extraction de la fumée commence suffisamment tôt.

- Les véhicules se tenant dans le courant d'air longitudinal accroissent fortement la turbulence verticale et favorisent le mélange vertical de la fumée.
- Dans un système de ventilation transversale, l'air frais injecté dans l'espace de circulation au niveau du sol provoque une rotation du courant d'air longitudinal, qui tend à ramener la couche de fumée vers la chaussée. C'est pourquoi il est recommandé de ramener le débit d'air frais à environ 1/2 - 1/3 du plein régime, cela dépendant de la quantité initiale du jet d'air frais. Dans un espace enfumé, il ne faut pas injecter d'air frais à partir du plafond car cela augmenterait la quantité de fumée et tendrait à détruire la stratification.
- Dans une ventilation semi-transversale réversible avec les gaines au plafond, l'air frais, en fonctionnement normal de ventilation, est injecté par des ouvertures au plafond. Si un incendie se déclenche, tant que l'air frais est fourni par ces ouvertures, la quantité de fumée augmente dans les mêmes proportions et des jets puissants tendent à ramener la fumée vers la surface de la chaussée. Le passage de l'injection d'air à l'extraction doit être réalisé aussi vite que possible.

To remove a stratified smoke layer out of the traffic room without disturbing the stratification, a continuous extraction into a return air duct is efficient. However, the following conditions must be fulfilled:

- The longitudinal velocity of the tunnel air must be below 2 m/s. These were the observations in the Japanese full scale tests. With higher velocities the vertical turbulence in the shear layer between smoke and fresh air quickly cools the upper layer and then the smoke mixes over the whole cross-section.
- With practically zero longitudinal air velocity, the smoke layer expands to both sides of the fire. The smoke spreads in a stratified way during up to 10 minutes, even without smoke extraction. After this initial phase smoke starts to mix over the whole cross-section unless by this time the extraction is in full operation.

With an air velocity around 2 m/s, most of the smoke of a medium size fire spreads to one side of the fire (little backlayering) and starts mixing over the whole cross section at a distance of 400 - 600 m downstream of the fire site. This mixing over the cross section can also be prevented if the smoke extraction is activated early enough.

- Vehicles standing in the longitudinal air flow increase strongly the vertical turbulence and encourage the vertical mixing of the smoke.
- In a transverse ventilation system, the fresh air jets entering the traffic room at the floor level induce a rotation of the longitudinal airflow, which tends to bring the smoke layer down to the road. That is the reason for the recommendation to throttle the fresh air rate to 1/2 - 1/3 of the full capacity, depending on the initial fresh air jet momentum. No fresh air should be injected from the ceiling in a zone with smoke, because this increases the amount of smoke and tends to suppress the stratification.
- In a reversible semi-transverse ventilation with the duct at the ceiling, the fresh air is added through ceiling openings in normal ventilation operation. If a fire occurs, as long as fresh air is supplied through ceiling openings, the smoke quantity increases by this amount and strong jets tend to bring the smoke down to the road surface. The changeover of the duct from supply to extraction must be done as quickly as possible.

Extraction continue ou concentrée des fumées

La façon traditionnelle d'extraire la fumée est d'utiliser de petites bouches en plafond réparties à intervalles courts tout le long du tunnel. Une autre manière efficace d'extraire rapidement la fumée de l'espace de circulation est d'installer de larges ouvertures avec des clapets télécommandés. Normalement, ceux-ci sont dans une position où l'extraction est effectuée de façon uniforme sur toute la longueur du tunnel. En cas d'incendie, la répartition de l'aspiration est adaptée à l'emplacement de l'incendie par télécommande individuelle des clapets dans les grandes ouvertures. De récents essais (CETU [71] et Memorial Tunnel [22]) ont démontré les avantages de ce système. Pour faciliter l'entretien, il existe des systèmes en usage où les grands clapets sont maintenus en position fermée par un électro-aimant ; dans la zone de l'incendie, les aimants ouvrent automatiquement les grands clapets par l'intermédiaire de détecteurs d'incendie ; les clapets s'ouvrent alors par gravité. Cependant, ce dernier système ne permet pas de fermer les ouvertures si un changement dans la ventilation déplace le panache de fumée à un autre endroit.

Capacité d'extraction

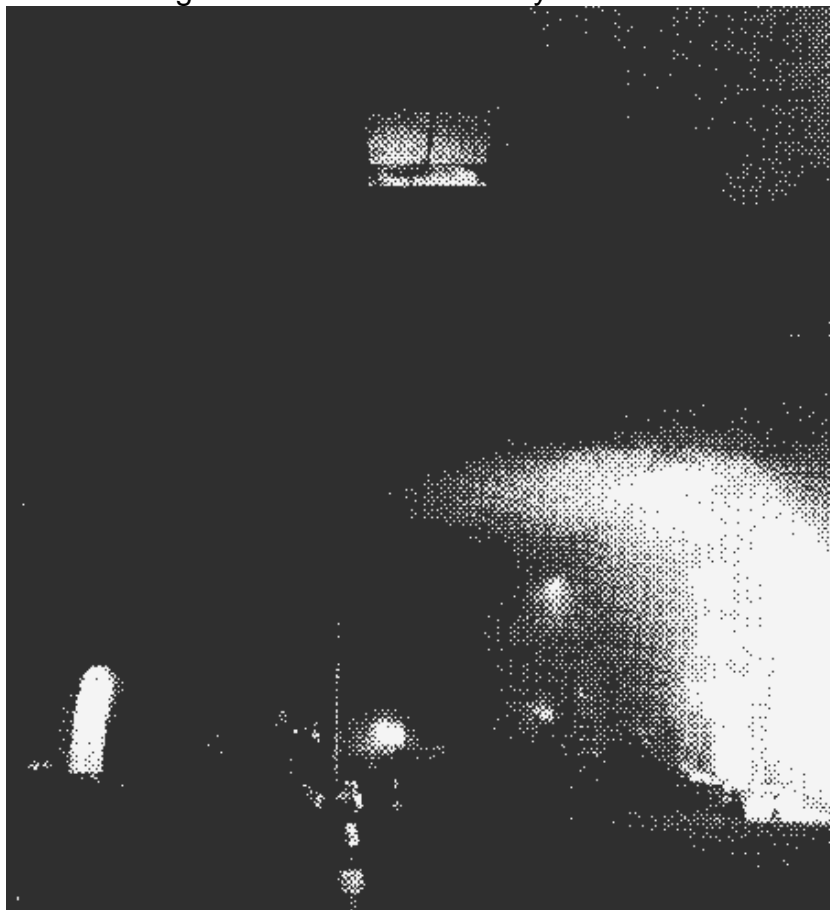
Dès qu'un incendie de dimensionnement a été choisi, ainsi que son débit de production de fumée, une longueur admissible sur laquelle la fumée peut se propager doit être fixée. Selon le type d'ouvertures (fixes ou télécommandées), la capacité d'extraction par mètre de longueur du tunnel dans la zone d'incendie est calculée. En général, un système d'extraction a besoin d'un moindre volume global d'aspiration lorsqu'il y a des clapets télécommandés que lorsque les ouvertures sont fixes. Cependant, il faut tenir compte du fait que pendant la première phase, entre le début de la propagation de la fumée et le plein fonctionnement du système d'extraction avec de grands clapets, la fumée peut s'être propagée sur un kilomètre, et peut-être plus, à partir du foyer de l'incendie. Il n'est donc pas suffisant d'ouvrir seulement quelques clapets proches de l'incendie, mais un débit minimum d'extraction le long de toute la section de ventilation est aussi recommandé. Une stratégie d'extraction doit être mise au point selon le type de tunnel et son système de ventilation.

Continuous or concentrated smoke extraction

The traditional way to extract smoke is to use small ceiling openings distributed at short intervals all along the tunnel. Another efficient way to remove smoke quickly out of the traffic room is to install large openings with remote controlled flaps. Normally they are in a position where equal extraction is taking place over the whole tunnel length. In case of fire the suction distribution is adapted to the fire location by remote control of the individual flaps in the large openings. Recent tests by CETU [71], and in the Memorial tunnel [22] proved the advantages of this system. To facilitate the maintenance, there are systems in use where the large flaps are held by a magnet in closed position; in the fire zone the magnets release the large flaps automatically via fire detectors, and the flaps then open by gravity force. However, this last system does not make it possible to close the openings if a change in the ventilation moves the smoke plume to another place in the tunnel.

Extraction capacity

Once a design fire and its amount of smoke production have been chosen, a permissible length over which the smoke may spread has to be fixed. Depending on the type of exhaust openings (fixed or remote-controlled), the extraction capacity per metre of tunnel length in the fire zone is derived. In general an extraction system needs less total exhaust volume when remote-



controlled flaps are installed than with fixed openings. However, it has also to be considered that in the first phase between start of the smoke spreading and full operation of the exhaust system with large flaps, the smoke may have spread over 1 km and more from the fire site. Thus it is not sufficient to only open a few exhaust openings near the fire, but a minimum exhaust rate along the whole ventilation section is recommended also. A suction strategy has to be developed depending on the type of tunnel and its ventilation system.

Photo 5.8.2.1 - Remote-controlled smoke opening in a French tunnel

Photo 5.8.2.1 - Ouverture d'extraction télécommandée dans un tunnel français

La capacité d'extraction sur la longueur où il est accepté que la fumée se propage, doit quelque peu dépasser le débit de fumée généré par l'incendie, car les ouvertures ne vont pas seulement aspirer de la fumée, mais, inévitablement, également de l'air frais. Il semble que 80 m³/s soit une valeur trop faible pour des poids lourds sans marchandises dangereuses, mais il n'existe pas de consensus pour recommander une nouvelle valeur.

Ouverture d'extraction ponctuelle

La propagation de la fumée dans tout le tunnel peut être retardée par une extraction importante de l'air directement à partir du tube de circulation, grâce à un placement adapté de l'ouverture d'extraction. Ce système fonctionne encore mieux lorsqu'il est combiné avec des accélérateurs. Il fait traditionnellement partie d'une ventilation longitudinale avec un ou plusieurs puits d'extraction.

La capacité d'extraction et la vitesse longitudinale créée par les accélérateurs dans la portion du tunnel emplie de fumée doivent être adaptées l'une à l'autre ainsi que contrôlées lors de l'exploitation. Il importe peu de savoir si la fumée est stratifiée ou si elle s'est propagée dans toute la section transversale du tunnel. La valeur d'extraction recommandée est fondée sur le produit section transversale x vitesse longitudinale. Il faut pouvoir obtenir un courant d'air longitudinal de 3 à 4 m/s et, de plus, une faible vitesse de l'air dans la section suivante de ventilation grâce à l'ouverture de l'extraction et ce, afin d'empêcher la propagation de la fumée au-delà du point d'aspiration.

V.8.3 Apport d'air frais

En cas d'incendie, il est recommandé que les jets d'air frais pénètrent l'espace de circulation au niveau de la surface de la chaussée. Leur vitesse de sortie doit être faible, de même que la distance entre chaque jet, afin d'obtenir une couche uniforme d'air frais au-dessus de la chaussée.

De cette manière, le mélange de la fumée et de la couche d'air frais est minime et les tourbillons de fumée qui se forment dans la couche d'air frais sont constamment dilués. Un incendie important génère de forts courants d'air longitudinaux qui lui procurent de l'oxygène. Grâce à une fourniture continue d'air frais le long du tunnel, cette vitesse longitudinale est réduite, ce qui encore une fois minimise le mélange de l'air et de la couche de fumée.

Les jets d'air frais à partir du plafond ne sont pas recommandés. Lorsque le jet d'air frais pénètre verticalement l'espace de circulation, il perce la couche de fumée, entraîne de la fumée à sa suite et l'injecte ainsi dans la couche d'air frais. Un jet défectueux peut également provoquer une rotation du volume global d'air du tunnel, ce qui tend à rabattre la couche de fumée. C'est pourquoi la vitesse de sortie des jets installés au plafond doit être faible. Les jets d'air frais à partir du plafond doivent être arrêtés immédiatement après déclenchement de l'alarme incendie dans la section de ventilation où l'incendie est situé. Pour de longs tunnels, il est recommandé de placer les bouches d'air frais près de la surface de la chaussée.

The extraction capacity over the length which is permissible for smoke to spread must somewhat exceed the smoke rate generated by the fire, because the openings will not only suck smoke but inevitably some fresh air too. It seems that 80 m³/s is too low for a heavy goods vehicles without dangerous goods, but there is no consensus to recommend a new value.

Point exhaust opening

The spreading of smoke over the whole tunnel length can be hindered by a large extraction of tunnel air directly out of the traffic tube with a suitable position of the extraction opening. This system works best in conjunction with jet fans. It is usually part of a longitudinal ventilation with one or several central exhaust shafts.

The exhaust capacity and the longitudinal velocity created by the jet fans in the tunnel section filled with smoke have to be matched as well as controlled under operation. It does not matter whether the smoke is stratified or spread over the whole tunnel cross section. The recommended extraction value is based on cross-sectional area × longitudinal velocity. It must be able to take out a longitudinal airflow of 3 to 4 m/s and furthermore a small air velocity in the following ventilation section towards the exhaust opening in order to prevent the spreading of smoke beyond the suction point.

V.8.3 Fresh air supply

It is recommended, during fires, that the fresh air jets enter the traffic room near the road surface. Their exit velocity should be small as well as the distances between the individual jets in order to obtain a uniform fresh air layer above the road.

In this way the mixing of smoke into the fresh air layer can be minimised and the smoke eddies being torn into the fresh air layer are continuously diluted. A large tunnel fire creates strong longitudinal airflows to supply the oxygen to the fire. With a continuous fresh air supply along the tunnel this longitudinal velocity is reduced, which again minimises the air exchange with the smoke layer.

Fresh air jets entering from ceiling openings are unfavourable. When they enter the traffic room vertically, they pierce the smoke layer, induce smoke into the jet and thus pump smoke into the fresh air layer. A strong jet also induces a rotation of the whole tunnel air volume what tends to bring the smoke layer down. Therefore the exit velocity of such ceiling jets should be small. Fresh air jets entering from the ceiling should be stopped immediately after fire alarm in the ventilation section where the fire is located. For longer tunnels it is recommended to position the fresh air outlets near the road surface.

V.8.4 Résistance à la chaleur des ventilateurs

Un ventilateur situé en fin de gaine d'aspiration est soumis à un mélange d'air très chaud provenant du voisinage immédiat de l'incendie, auquel s'ajoute de l'air plus frais provenant des zones plus éloignées de l'incendie. Ce mélange d'air chaud et frais se déplace ensuite dans la gaine du tunnel et se refroidit de plus en plus. Des essais dans le tunnel du Zwenberg en Autriche et dans le Memorial tunnel aux États-Unis ont révélé des températures de l'air, au droit d'un ventilateur, inférieures à 250 °C, même si l'incendie était proche de la station de ventilation. Une résistance des ventilateurs à une température de 250 °C est donc suffisante.

La situation est très différente dans le cas d'un système ouvert où l'air est prélevé directement de l'espace de circulation par de grandes ouvertures d'extraction et où les ventilateurs sont situés près de ces ouvertures. Lorsque ces ventilateurs sont placés à l'extrémité d'un puits, ce dernier favorise le refroidissement.

V.8.5 Contrôle de la vitesse longitudinale

Afin de conserver intacte la stratification de la fumée, il est nécessaire d'avoir une faible vitesse longitudinale ; en même temps, cette vitesse doit être suffisamment importante pour repousser la fumée d'un côté de l'incendie.

On peut concilier les deux en installant des accélérateurs. Cependant, mettre en marche au bon moment le nombre adéquat d'accélérateurs lorsque l'incendie s'est déclaré n'est pas une tâche aisée. Ainsi, il est important qu'aucun accélérateur n'ait été mis en route à un endroit où il y a de la fumée ou proche de celle-ci, car cela détruirait immédiatement la stratification de la fumée.

Le meilleur moyen de contrôler la vitesse longitudinale est de prévoir plusieurs cantons indépendants de ventilation. Lorsqu'un tunnel est ainsi équipé, une certaine vitesse longitudinale dans le secteur de l'incendie peut être assurée grâce à une exploitation convenable des gaines d'air individuelles. En inversant le fonctionnement des ventilateurs, une gaine d'extraction de l'air pollué peut aussi être utilisée en tant que gaine d'amenée d'air frais, et inversement.

Quels que soient les moyens de contrôle de la vitesse longitudinale de l'air, leur exploitation doit être préprogrammée en fonction de l'emplacement de l'incendie.

V.8.4 Heat resistance of fans

A fan at the end of an exhaust air duct is exposed to a mixture of very hot air from the immediate surrounding of the fire plus cooler air from further away from the fire. This mixture of hot and cooler air then travels in the concrete duct of the tunnel and gets cooled down furthermore. Tests in the Zwenberg tunnel in Austria or in the Memorial Tunnel in the USA gave air temperatures at the fan below 250 °C even when the fire was very near the fan station. A fire resistance of the fans to 250 °C is then sufficient.

The situation is very different for an open system where tunnel air is taken directly out of the traffic room by large exhaust openings and the fans are positioned near the extraction openings. In the case that such fans are placed at the end of a shaft, the shaft has a favourable cooling effect.

V.8.5 Control of longitudinal velocity

To keep the stratification of the smoke intact a low longitudinal velocity is required and in order to push the smoke to one side of the fire a minimal longitudinal air velocity is needed.

By installing jet fans in the tunnel, this could be achieved. However, to put the right number of jet fans into operation within a few minutes after start of the fire is not an easy control task. Also it is important that no jet fan is switched on in or near a place where there is smoke, because this would immediately destroy the smoke stratification.

The most usual way to control the longitudinal velocity is to provide several independent ventilation sections. When a tunnel has several ventilation sections, a certain longitudinal velocity in the fire section can be obtained by a suitable operation of the individual air ducts. By reversing the fan operation an exhaust air duct can also be used as supply air duct and vice versa.

Whatever the means of controlling the longitudinal air velocity are, their operation has to be pre-programmed according to the location of the fire in the tunnel.