

4 VENTILATION

4.1 Introduction

En cas d'incendie dans un tunnel, le système de ventilation doit être exploité de façon à établir et maintenir les conditions appropriées pour l'auto-évacuation des usagers et les opérations de secours. Il existe deux types principaux de systèmes de ventilation pour les tunnels routiers – transversal et longitudinal. La capacité du système longitudinal est traditionnellement dimensionnée pour éviter la remontée des fumées en sens contraire du courant d'air (backlayering). Le système transversal est dimensionné et exploité pour extraire les fumées (de façon idéale à partir d'une couche stratifiée dans la partie supérieure du tunnel) [2].

4.2 Travaux antérieurs de l'AIPCR

Les publications AIPCR « Tunnels routiers : pollution, ventilation, environnement » (1995) [15] et « Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers » (1999) [2] donnent des informations sur les systèmes de ventilation transversale et longitudinale, y compris sur leur dimensionnement. Aucune nouvelle donnée n'a été recueillie depuis la publication de ces documents, que ce soit à partir de la pratique ou de la recherche.

Les références [2] et [15] donnent les formules de base pour le dimensionnement des systèmes d'accélérateurs utilisés pour la ventilation longitudinale. Elles sont répétées ici, dans un but d'illustration. La référence [2] donne des informations qualitatives sur les influences météorologiques et les effets de l'incendie sur le courant d'air le long du tunnel. Des informations quantitatives sont aussi disponibles actuellement. Des recommandations pour l'implantation des accélérateurs dans le tunnel sont données dans la référence [2] ; des informations supplémentaires sur l'optimisation de l'implantation des accélérateurs sont maintenant disponibles.

4.3 Ventilation transversale

4.3.1 Objectifs

L'objectif de la ventilation transversale est de protéger les usagers en maintenant la fumée stratifiée dans une nappe chaude sous le plafond du tunnel et en l'extrayant à ce niveau. Cette stratification n'est pas très stable et peut facilement être perturbée par le courant d'air longitudinal induit par les véhicules en mouvement, par les différences de pression entre les têtes du tunnel, la ventilation, etc. Par conséquent il est fortement conseillé de maîtriser le courant d'air longitudinal au moyen de la ventilation du tunnel.

4 VENTILATION

4.1 Introduction

In case of a fire in a tunnel, the ventilation system must be operated in order to establish and maintain appropriate conditions for self-evacuation and rescue operations. There are two main types of tunnel ventilation systems installed in road tunnels – transverse and longitudinal. Traditionally, the longitudinal system capacity is sized to prevent backlayering. The transverse system is sized and operated to extract smoke (hopefully from a stratified layer at the top of the tunnel space) [2].

4.2 Previous Work by PIARC

In the PIARC reports “Road Tunnels: Emissions, Ventilation, Environment” (1995) [15] and “Fire and Smoke Control in Road Tunnels (1999)” [2], information is given on transverse and longitudinal ventilation systems, including design information. Since these documents were published, new information has been gained from practice and research.

In references [2] and [15] basic formulae are given for designing jet fan systems used in longitudinal ventilation. They are repeated here for illustration purposes. In reference [2] qualitative information is given on meteorological influences and the effect of fire on the airflow through the tunnel. Quantitative information is now also available. Recommendations for fan distribution along the tunnel are included in reference [2]; additional information on optimising fan distribution is now available.

4.3 Transverse Ventilation

4.3.1 Objectives

The aim of transverse ventilation is to protect the tunnel users by keeping the smoke stratified in a hot layer underneath the ceiling of the tunnel and extracting it at the ceiling. Smoke stratification is not a very robust effect; it can easily be disturbed by the longitudinal airflow induced by moving vehicles, pressure differences between portals, ventilation, etc. As a consequence it is highly advisable to control the longitudinal airflow by means of the tunnel ventilation.

Dans le texte qui suit, le terme « système de ventilation transversal » inclut les systèmes aussi bien transversaux que semi-transversaux. Le nom spécifique du système utilisé est fonction de la présence de gaines d'air frais et d'extraction d'air vicié et/ou de l'équilibre entre les taux d'air injecté et extrait comme expliqué dans la référence [2].

L'Annexe 12.2 présente une adaptation du système transversal, tel qu'il a été mis en place au cours de la rénovation du tunnel du Mont-Blanc.

En général, la ventilation transversale utilise des conduites parallèles au tunnel. Deux types de conduites sont utilisés :

- les gaines d'air frais, qui servent à injecter l'air frais dans le tunnel afin de diluer la pollution émise par les véhicules,
- les gaines d'extraction, qui servent à extraire l'air hors du tunnel. Le but principal de l'extraction est d'évacuer les fumées et les gaz chauds produits par un incendie. Dans certains cas, la capacité d'extraction peut être utilisée pour limiter la vitesse longitudinale de l'air dans le tunnel en exploitation normale.

La capacité d'extraction peut en général être concentrée dans une zone plus petite que la longueur de la gaine par l'utilisation de registres motorisés, contrôlés à distance, connus également sous le nom de trappes d'extraction. Les ventilateurs desservant les gaines sont souvent installés dans des usines de ventilation proches des têtes du tunnel, ou dans des puits ; mais il existe de nombreuses variantes.

4.3.2 Règles de dimensionnement

Exigences concernant l'air frais

Les règles de dimensionnement des capacités des gaines et des ventilateurs d'air frais sont directement liées aux besoins de dilution de la pollution. Les polluants contrôlés ordinairement sont le monoxyde de carbone (CO) et les particules qui ont un effet négatif sur la visibilité. Certains pays contrôlent aussi les oxydes d'azote (NO_x).

Le calcul des besoins en air frais utilise les paramètres suivants :

- émissions unitaires des véhicules (données par l'AIPCR ou les recommandations nationales),
- densité et vitesse du trafic,
- seuils d'acceptabilité pour chaque polluant.

D'une façon générale, le dimensionnement de la ventilation est en relation directe avec les besoins en air frais calculés. Cette approche ne prend pas en compte l'effet de pistonement du trafic. Dans certains cas, par exemple en présence de trafic rapide, le pistonement peut auto-ventiler le tunnel.

In the following text, the wording “transverse ventilation system” includes both full transverse and semi- (partial) transverse systems. The specific name of the system employed is a function of the presence of fresh air and extraction air ducts and/or the operational imbalance of injected and extracted airflow rates as explained in reference [2].

An adaptation of the transverse system, as implemented in the renovation of the Mont Blanc Tunnel, is presented in Appendix 12.2.

Generally, transverse ventilation uses ducts that run parallel to the tunnel. Two kinds of ducts are utilised:

- Fresh air ducts are used to inject fresh air into the tunnel in order to dilute the polluted gases produced by the vehicles;
- Extraction or exhaust ducts are used to extract air from the tunnel volume. The main purpose of extraction is to remove the smoke and hot gases produced by a fire. In some cases, the extraction capacity may be used in order to limit the longitudinal velocity in the tunnel under normal operation.

Extraction capacity is usually concentrated to a zone smaller than the length of the duct by the addition of motorized, remotely controlled dampers, also known as “point extraction”. The fans serving the ducts are often located in ventilation plants close to the tunnel portals or shafts; however, many variations can exist.

4.3.2 Dimensioning Rules

Fresh Air requirements

The dimensioning rules for the fresh air fan capacities and ducts are directly linked to the pollution dilution requirements. The pollutants that must usually be controlled are carbon monoxide (CO), and particulate matter that negatively affects visibility. Some countries also control nitrogen oxides (NO_x).

The fresh air requirement calculations utilize the following parameters:

- The unit emissions of the vehicles (provided by PIARC or national recommendations);
- The traffic density and speed;
- The threshold limits for each pollutant.

Generally, the ventilation sizing is directly related to the calculated airflow requirement. This approach does not take into account the traffic piston effect. In some cases, such as with fast moving traffic, the piston effect can self-ventilate the tunnel.

Maîtrise des fumées dans les tunnels avec ventilation transversale

Pour dimensionner une ventilation transversale, deux aspects doivent être pris en compte :

- le débit de fumées,
- les exigences de maîtrise du courant d'air longitudinal.

Le rapport AIPCR [2] donne un tableau et les relations correspondantes entre la puissance thermique et le débit de fumée.

La maîtrise du courant d'air longitudinal est un critère de dimensionnement aussi important que le débit des fumées.

Equipement de la gaine d'extraction

Les ventilateurs d'extraction doivent être dimensionnés de façon à assurer les débits d'extraction requis, quel que soit l'emplacement du foyer à l'intérieur du tunnel. Dans le passé, ces gaines d'extraction étaient communément reliées au tunnel par un ensemble de petites bouches, ouvertes, placées à intervalles réguliers. L'espacement entre ces bouches était normalement de 10 à 20 m, et le débit de l'ordre de 80 m³/s/km. Ce concept a évolué depuis lors, les bouches de petite taille et ouvertes étant remplacées par des bouches de plus grandes dimensions, équipées de registres motorisés commandés à distance, et situées à intervalles plus grands. On a examiné l'intérêt d'utiliser des fusibles et des panneaux thermiques, mais ce système s'est révélé présenter des effets défavorables. L'efficacité du système de désenfumage utilisant ces panneaux était compromise par l'ouverture inopportune de certains registres et/ou l'ouverture de registres en des emplacements non optimaux.

4.3.3 Exigences pour la stratification des fumées

La plupart des recommandations concernant l'exploitation d'un système de ventilation transversale insistent sur la nécessité de préserver les conditions de stratification et d'évacuer la fumée hors du tunnel [2 ; 16].

La commande et le contrôle centralisés des équipements sont nécessaires pour optimiser les effets de la ventilation. La localisation précise du foyer doit être connue, afin de concentrer la capacité d'extraction dans la zone du foyer en ouvrant le(s) trappe(s) d'extraction appropriée(s) et de contrôler le courant d'air longitudinal dans cette zone afin de limiter la stratification des fumées.

La caractérisation de la stratification est encore à l'étude et fait l'objet de recherches. La condition principale de la stratification semble être la limitation de la vitesse longitudinale. Celle-ci tend à :

- augmenter la turbulence et les effets de mélange entre les couches de fumée,
- augmenter les échanges thermiques entre les diverses couches de fumées et entre la fumée et les parois.

Smoke control in tunnels with transverse ventilation

To size a transverse ventilation system, two aspects must be considered:

- the smoke flow rate
- the requirements to control the longitudinal air flow.

The PIARC report [2] provides a table and the relevant relationship between heat release and smoke flow rates.

The control of the longitudinal airflow is as important a design criteria as the extraction flow rates and must be carefully studied.

Extraction Duct Equipment

The extraction fans must be sized to ensure the required extraction airflow rates for all fire locations in the tunnel. In the past, extraction ducts were typically connected to the tunnel with a number of small, evenly spaced open vents. The spacing between these vents was typically 10 to 20 m and the airflow rate on the order of 80 m³/s/km. This concept has since evolved by replacing the small, open vents with larger vents equipped with remotely controlled motorised dampers and spaced further apart. The use of thermal fuses and panels has been assessed and found to have adverse effects: the effectiveness of the smoke control system using such thermal devices was found to be compromised by the untimely opening of some dampers and/or the opening of dampers in non-optimal locations.

4.3.3 Requirements for smoke stratification

Most recommendations related to transverse ventilation system operation point out the necessity to preserve the stratification conditions as well as to remove the smoke from the tunnel [2; 16].

Centralized monitoring and control of equipment is required to optimize the ventilation response. The precise location of the fire must be known in order to concentrate the extraction capacity in the fire area by opening the appropriate damper(s) and control the longitudinal airflow in this area in order to keep smoke stratification.

The stratification characterization is still under development and subject to research work. The main condition for stratification development appears to be the limitation of longitudinal velocity. Longitudinal velocity tends to:

- increase the turbulence and mixing effects between smoke layers,
- increase the thermal exchange between the individual smoke layers and between the smoke and the walls.

D'autres causes importantes de la destruction de la stratification sont :

- l'effet de tirage induit par les véhicules se déplaçant au-dessous d'une couche stratifiée,
- l'injection d'air frais dans le tunnel, qui peut induire un tourbillon le long du tunnel et/ou, dans le cas de bouches situées au plafond, la convection de la fumée jusqu'au niveau du sol,
- la turbulence provoquée par des accélérateurs mis en route à proximité de la couche stratifiée.

Dans le cas d'une ventilation transversale, il est difficile de résoudre le problème de la maîtrise de la vitesse longitudinale, cette vitesse variant en fonction de l'emplacement le long du tunnel. L'exploitation du système de ventilation dépend donc de la localisation du foyer.

La recommandation la plus courante pour la maîtrise de la vitesse longitudinale dans le cas d'un système transversal est de jouer sur les débits d'injection et d'extraction. Cette solution soulève toutefois plusieurs problèmes :

- il est admis que l'injection d'air frais peut présenter un risque pour la stratification des fumées, en particulier si le jet d'air passe à travers la couche de fumée. Les bouches d'air frais ne doivent donc pas être situées le long de la partie supérieure des parois [18]. En outre, des études effectuées pour la rénovation du tunnel du Mont-Blanc ont montré que, même si l'injection se produit au bas des parois, le risque de destratification des fumées demeure. Pour minimiser ce risque, les vitesses d'injection de l'air frais doivent rester aussi faibles que possible ;
- la vitesse longitudinale peut subir de fortes variations si le courant d'air naturel change pendant l'incendie ;
- l'exploitation est complexe, car il n'y a pas de relation directe entre la commande du système de ventilation et la vitesse longitudinale qui en résulte. De plus, la ventilation naturelle induit une complexité supplémentaire.

Cette technique consistant à jouer sur les débits d'injection et d'extraction est limitée aux différences de pression relativement faibles. Pour les tunnels ventilés transversalement avec des influences atmosphériques fortes (par exemple, tunnels longs traversant de hautes montagnes), il peut être nécessaire de mettre en place des accélérateurs pour maîtriser le courant d'air longitudinal.

Other main causes of stratification destruction are:

- the drag effect induced by vehicles moving beneath a stratified layer;
- the injection of fresh air into the tunnel, which can induce a swirl along the tunnel and/or, in the case of vents located at the ceiling, cause smoke convection to the tunnel floor;
- the turbulence caused by jet fans activated in the vicinity of the stratified layer.

With transverse ventilation systems, the problem of longitudinal velocity control is difficult to solve since the velocity varies according to the location along the tunnel. Ventilation system operation is therefore dependent on fire location.

The most common recommendation for controlling longitudinal velocity with a transverse system is to act on the injection and extraction flow rates. There are several problems associated with this solution:

- it is recognized that fresh air injection can present a risk to smoke stratification, especially if the jet passes through the smoke layer. Therefore, fresh air vents should not be located along the top of the walls [18]. Furthermore, some studies performed for the Mont Blanc Tunnel renovation have shown that even if the injection is performed at the bottom of the walls, the risk of smoke de-stratification may remain. To minimize this risk, fresh air injection velocities should be kept as low as possible;
- severe changes in longitudinal velocity can occur if the natural ventilation flow varies during the fire;
- operation is complex because the relationship between the ventilation system operation and the resulting longitudinal velocity is not direct. Moreover, natural ventilation introduces an additional complexity.

This technique of acting on injection and extraction flow rates is limited to relatively low ranges of atmospheric pressure differences. For transversely ventilated tunnels with high atmospheric influences (e.g. long tunnels crossing high mountains), it may be necessary to install jet fans to ensure longitudinal velocity control.

4.3.4 Spécifications concernant les équipements

Ventilateurs d'extraction

Les études et les essais en vraie grandeur montrent que l'air frais peut produire une dilution importante à l'intérieur des gaines de ventilation. Le mélange air/fumée est également soumis à des échanges thermiques avec les parois de la conduite avant d'atteindre les ventilateurs. Il peut aussi se produire une expansion thermique résiduelle des gaz passant dans les ventilateurs. Ces phénomènes doivent être pris en compte lorsque l'on établit les critères de résistance thermique et les capacités des ventilateurs d'extraction.

La résistance thermique des ventilateurs doit permettre l'extraction des fumées chaudes, quelle que soit la configuration. Le rapport AIPCR [2] se réfère aux essais d'incendie dans le Memorial Tunnel et le tunnel du Zwenberg, pour lesquels on a utilisé des systèmes de ventilation semi-transversale. La température au niveau des ventilateurs n'a que rarement atteint 200°C avec des bouches d'extraction uniformément espacées. Cependant, lorsque le foyer d'incendie est assez proche du point d'extraction, la température d'extraction peut largement dépasser 200°C. C'est pourquoi la résistance thermique des ventilateurs d'extraction a été portée à 400°C pendant 90 minutes en Allemagne et en Autriche, et à 200 ou 400°C pendant 120 minutes en France, en fonction de la position des ventilateurs par rapport au tunnel.

Trappes d'extraction

Pour remplir leur fonction, les trappes d'extraction doivent être capables de résister aux conditions environnementales habituelles en tunnel et de fonctionner dans des conditions d'urgence. Les principaux points suivants sont à prendre en considération :

- les trappes peuvent être soumises à des différentiels de pression importants lorsqu'ils sont en position fermée (c'est-à-dire 2 000 Pa à 6 000 Pa en fonction de la longueur de la conduite d'extraction), et ils doivent pouvoir s'ouvrir dans ces conditions ;
- les trappes doivent pouvoir fonctionner correctement dans des conditions de température élevée et être construites de façon à éviter que des pièces se détachent et tombent dans le tunnel en cas d'incendie ;
- les trappes doivent être raisonnablement étanches à l'air pour éviter un effet de by-pass qui réduirait l'efficacité de l'extraction des fumées.

On trouvera des informations plus détaillées sur les trappes d'extraction dans l'Annexe 12.4.

4.3.4 Equipment Specifications

Extraction Fans

Studies and full-scale tests show that significant dilution by fresh air can take place inside the duct. The fresh air/smoke mixture is also subject to thermal exchange with the duct walls before reaching the fans. There can also be residual thermal expansion of the gases passing through the fans. These phenomena must be taken into account when establishing the thermal resistance criteria and capacities of the extraction fans.

The thermal resistance of the fans must ensure that the extraction of the hot smoke is possible with any configuration. The PIARC report [2] refers to the Memorial Tunnel and the Zwenberg Tunnel fire tests in which semi-transverse ventilation systems were used. The temperature rise at the fans hardly reached 200°C with uniformly spaced extraction ports. However, when the fire location is relatively close to the extraction point, the exhaust temperature may be significantly higher than 200°C. This was the reason for increasing the thermal resistance of exhaust fans in Austria and Germany to 400°C for 90 minutes, and in France 200 or 400°C for 120 minutes depending on the location of the fans relative to the traffic room.

Smoke Dampers

To fulfill their function, dampers must be able to withstand normal tunnel environmental conditions and operate under emergency conditions. The main considerations include the following:

- Dampers may be subjected to large pressure differentials when in the closed position (i.e., 2000 Pa to 6000 Pa depending on the length of the extraction duct), and must be able to open under these conditions
- Dampers must be able to operate properly under high temperature conditions and must be constructed in such a way to prevent individual parts from separating and falling into the tunnel during fire conditions.
- Dampers should be reasonably airtight to avoid short-circuiting that would reduce the efficiency of the smoke extraction.

More detailed information on smoke dampers can be found in Appendix 12.4.

4.4 Ventilation longitudinale

4.4.1 Introduction

Dans les systèmes de ventilation longitudinale, le tunnel est utilisé comme une « conduite » pour l'extraction des fumées. On considère que ces systèmes assurent un bon niveau de sécurité en cas d'incendie dans les tunnels unidirectionnels. Bien qu'il soit possible, mais peu probable, que des usagers puissent être affectés par la fumée poussée par les ventilateurs (par exemple s'ils se trouvent en aval de l'incendie en raison d'un embouteillage), on considère que la plupart des usagers se trouvent dans la zone amont (exempte de fumée).

En revanche, dans un tunnel bidirectionnel, un nombre important d'usagers peut être soumis aux fumées si un système longitudinal est utilisé. Dans ce cas, la combinaison ventilation longitudinale et extraction des fumées par des trappes en plafond peut être satisfaisante sous certaines conditions. En tout état de cause, la ventilation longitudinale ne devrait être utilisée dans des tunnels bidirectionnels que si une analyse de risques montre que cette solution est acceptable.

Le présent chapitre a pour but de développer plutôt que de répéter les informations données dans les références [2] et [15]. Le dimensionnement des accélérateurs doit prendre en compte l'influence de l'incendie sur le système d'accélérateurs, les effets météorologiques aux têtes du tunnel (principalement le vent), l'implantation optimale des ventilateurs, leur efficacité, ainsi que les niveaux sonores créés par le système d'accélérateurs.

L'Annexe 12.3 présente les deux équations de base nécessaires pour dimensionner correctement une ventilation longitudinale à base d'accélérateurs, ainsi que des exemples.

4.4.2 Impact sonore des accélérateurs dans un tunnel

Les accélérateurs en fonctionnement dans un tunnel peuvent générer des niveaux de bruit élevés et avoir des effets négatifs sur les transmissions orales entre les personnes se trouvant dans le tunnel. Cela peut devenir un enjeu de sécurité quand le niveau sonore empêche que les usagers ne comprennent ce qu'on leur demande de faire ou gêne les communications entre pompiers. En conséquent, l'analyse de l'impact sonore des accélérateurs doit être faite avec soin, comme indiqué dans l'annexe 12.6.

4.4 Longitudinal Ventilation

4.4.1 Introduction

Longitudinal ventilation systems utilize the tunnel tube as the “duct” for smoke extraction. Such systems are seen as providing reliable safety in case of a fire accident for unidirectional tunnel tubes. Although there is a slight possibility that road users can be affected by the smoke being pushed by the fans (for example, if they cannot leave the tunnel downstream of the fire due to a traffic jam), most road users can be expected to be located in the upstream (smoke free) area of the tunnel.

In a bi-directional tunnel, on the other hand, a large number of road users may be affected by smoke if only a longitudinal system is used. In such cases, the combination of longitudinal ventilation and smoke extraction via ceiling dampers can be satisfactory under certain conditions. In any case, longitudinal ventilation should be used in bi-directional tunnels only if a risk analysis shows it is acceptable.

The purpose of this section is to extend rather than to repeat the information given in references [2] and [15]. Considerations in jet fan design include the influence of fire on the jet fan system, the meteorological effects at tunnel portals (mainly wind), the optimal placement of the fans, the efficiency of the fans, and the sound levels created by the fan system.

The two basic equations required for the proper sizing of jet fan-based longitudinal ventilation, along with examples of such, are shown in Appendix 12.3.

4.4.2 Sound Impact of Jet Fans in a Tunnel

Jet fans operating in a tunnel can generate high noise levels, and can have adverse effects on speech transmission between people in the tunnel. This may become a safety issue when the noise level prevents the tunnel users from understanding what they are asked to do or when it makes it difficult for the firemen to communicate with each other. Therefore some care must be taken in the assessment of sound emission by the jet-fans, as detailed in appendix 12.6.

4.5 Essais

On peut avoir recours à trois types d'essais pour vérifier les équipements et les objectifs de sécurité du système de ventilation :

- les essais de réception (en usine) ont pour but de vérifier si les performances réelles de l'équipement concordent avec les spécifications. Les directives d'essai soulignent généralement les procédures de ces essais ;
- les essais in-situ ont pour but de vérifier que le fonctionnement de l'équipement répond aux spécifications du projet ;
- les essais d'intégration ont pour but de vérifier que les objectifs de sécurité sont atteints, en particulier en ce qui concerne la maîtrise des fumées. Le premier jeu d'essais d'intégration peut être effectué sans incendie, afin de quantifier la capacité de ventilation, et un second jeu d'essais peut impliquer un incendie calibré afin de tenir compte des effets de flottabilité et visualiser le développement des fumées.

Il n'est généralement pas possible d'effectuer des essais d'intégration avec des incendies aussi importants que les incendies de dimensionnement. La plupart du temps, ces essais ont pour but principal de former les exploitants du tunnel et les pompiers.

Le chapitre 8 décrit les tests de ventilation appropriés.

4.5 Tests

Three kinds of tests may be performed in order to check the equipment and the safety objectives of the ventilation system:

- Reception (factory) tests are aimed at checking that the equipment actual performance matches the specified requirements. The test guidelines generally point out the procedures for these test operations.
- On-site unit tests are aimed at checking that equipment operation is in accordance with the project specifications.
- Integration tests are aimed at checking that the safety objectives match, especially with regard to smoke control. The first set of integration tests may be performed without a fire in order to quantify the ventilation capacity, and a second set of tests may involve a calibrated fire in order to account for the buoyancy effects and to visualize the smoke development.

It is generally impossible to perform integration tests with fires as large as the design fires. Most commonly, the main purpose of these tests is to train tunnel operators and members of the fire brigade.

Section 8 describes appropriate ventilation tests.