



- Des systèmes de ventilation transversaux ou semi-transversaux ayant la capacité d'évacuer les fumées en cas d'incendie doivent être utilisés dans les tunnels où la ventilation longitudinale n'est pas autorisée.
- Dans les tunnels de plus de 3 000 m de longueur à trafic bidirectionnel, avec un volume de trafic quotidien supérieur à 2 000 véhicules par voie et dotés d'un poste de contrôle-commande, les systèmes de ventilation transversaux et/ou semi-transversaux doivent comporter des trappes d'extraction de l'air et des fumées qui puissent être commandés séparément ou par groupes. Il est également requis que la vitesse longitudinale de l'air soit constamment surveillée et que le système de ventilation soit ajusté en conséquence.

### ► TEXTES NATIONAUX

Des textes nationaux tels que ceux de l'Autriche (RVS 09.02.31) [3], de l'Allemagne (RABT) [4], de la Suisse (OFROU) [5], de la France [6, 7] et des Pays-Bas [8] prévoient déjà des procédures pour la gestion de la ventilation en cas d'incendie. L'annexe A au présent document reprend sous forme résumée les recommandations des textes autrichiens, suisses, français et allemands en ce qui concerne les procédures à adopter. Le tableau B.1 de l'annexe B présente une liste générale des textes applicables aux tunnels routiers au niveau mondial.

## ► CLASSIFICATION DES SYSTÈMES DE VENTILATION

### ► INTRODUCTION

La ventilation des tunnels peut être assurée soit par des moyens naturels, soit par des moyens mécaniques. Les systèmes naturels recourent à l'effet de pistonement des véhicules en mouvement, au vent extérieur ainsi qu'aux différences de température et de pression entre les têtes pour produire un courant d'air à travers le tunnel. Les systèmes de ventilation mécaniques utilisent des ventilateurs pour produire des courants d'air et peuvent comporter des gaines et des dispositifs d'injection ou d'extraction pour distribuer ces courants d'air. Indépendamment de l'équipement de ventilation mécanique, les courants d'air naturels mentionnés plus haut sont présents dans tous les tunnels à des degrés variables.

La classification générale des systèmes de ventilation repose sur la direction du courant d'air dans l'espace de circulation. La ventilation longitudinale est parallèle à l'axe du tunnel, tandis que la ventilation transversale est perpendiculaire à cet axe et reste dans le plan d'un profil en travers.

- Transverse or semi-transverse ventilation systems with the capability to evacuate smoke in the event of a fire are to be used in tunnels where longitudinal ventilation is not allowed;
- Transverse and/or semi-transverse ventilation systems in tunnels longer than 3,000 m with bi-directional traffic and a daily traffic volume higher than 2,000 vehicles per lane, and with a control centre, require that air and smoke extraction dampers are installed and can be operated separately or in groups. It is also a requirement that the longitudinal air velocity is monitored constantly and the ventilation system adjusted accordingly.

### ► NATIONAL GUIDELINES

National guidelines like those in Austria (RVS 09.02.31) [3], Germany (RABT) [4], Switzerland (FEDRO) [5], France [6, 7] and the Netherlands [8] have already adopted procedures for the management of the ventilation in case of a fire. Appendix A gives a summary of the recommendation of the Austrian, Swiss, French and German guidelines in terms of the procedures adopted. Table B.1., in Appendix B, presents a general list of worldwide road tunnel guidelines.

## ► CLASSIFICATION OF VENTILATION SYSTEMS

### ► INTRODUCTION

Tunnel ventilation can be achieved by either natural or mechanical means. Natural systems rely on the piston-effect of moving vehicles, external wind, and temperature and pressure differentials between the portals to produce airflow through the tunnel. Mechanical ventilation systems use fans to produce airflows and may use ducts and dampers to distribute this airflow. Regardless of mechanical ventilation equipment, the naturally induced airflows mentioned above are present in all tunnels to a varying extent.

The general classification of a ventilation system is based on the direction of airflow in the traffic space. Longitudinal ventilation is in the direction of the tunnel axis whereas transverse is perpendicular to the tunnel axis in the plane of a cross section.



Certains systèmes de ventilation sont utilisés de la même manière pour l'exploitation normale et pour la gestion des fumées en cas d'incendie, alors que d'autres sont utilisés différemment pour ces deux tâches. De ce fait, une classification simple est souvent inadaptée pour décrire précisément un système de ventilation donné. Par exemple, dans le cas d'un tunnel doté d'un système de ventilation longitudinal pour l'exploitation normale et de trappes de désenfumage télécommandées dans une gaine d'air vicié dédiée, reliée à des ventilateurs d'extraction des fumées conçus pour obtenir un désenfumage localisé en cas d'incendie, le système de ventilation devrait être décrit comme « *longitudinal avec extraction localisée des fumées* ».

### ► PRINCIPES AÉRODYNAMIQUES DE BASE

La ventilation des tunnels repose sur l'application de l'un ou l'autre des principes suivants :

- Dilution de l'air pollué/des fumées, ou
- Enlèvement de l'air pollué/des fumées.

La dilution constitue généralement une méthode efficace en exploitation normale, où l'objectif est de maintenir la qualité de l'air et la visibilité au-dessus de la valeur limite, voir par exemple le rapport AIPCR *Tunnels routiers : Emissions des véhicules et besoins en air pour la ventilation* [9]. Il est souvent possible d'utiliser le même principe de ventilation pour une exploitation normale avec trafic et pour une exploitation normale pour activités de maintenance, bien qu'avec des critères différents pour la qualité de l'air et la visibilité souhaitées.

En situation d'urgence, la gestion des fumées est assurée dans l'idéal par le renouvellement de l'air, par exemple par l'extraction de l'air et des fumées. Toutefois, la dilution peut augmenter la tenabilité, par exemple en réduisant la concentration des gaz toxiques. De ce fait, l'air vicié est remplacé par de l'air pur ou sans fumée, soit amené mécaniquement, soit entraîné depuis les têtes.

### ► CLASSIFICATION GÉNÉRALE DES SYSTÈMES DE VENTILATION

#### Ventilation longitudinale

Les systèmes longitudinaux garantissent un courant d'air longitudinal le long de l'axe du tunnel. L'air peut être introduit ou retiré du tunnel à un nombre de points limité, tels que les têtes ou des puits de ventilation.

Some ventilation systems are used in the same manner for both normal operation and for smoke management in case of a fire whereas other systems are applied differently for these two tasks. Hence, a simple classification is often inadequate for a precise description of a specific ventilation system. For example, in the case of a tunnel with a longitudinal ventilation system for normal operation and remote-controlled dampers in a dedicated smoke duct connected to smoke-extraction fans designed to obtain localised smoke extraction in case of fire, the ventilation system should be described as “*longitudinal with localized smoke-extraction*”.

### ► BASIC AERODYNAMIC PRINCIPLES

Tunnel ventilation is based on the application of one of two principles:

- dilution of polluted air/smoke or
- removal of polluted air/smoke

Dilution is usually an efficient method for normal operation, in which case the objective is to maintain air quality and visibility above the limit value, see for example the PIARC report *Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation* [9]. It is often possible to use the same ventilation principle for normal operation with traffic and normal operation for maintenance activities, though having different criteria for the desired air quality and visibility.

During emergency operation, smoke management is ideally achieved by renewal of air e.g. by the extraction of air and smoke. However, dilution can increase tenability e.g. by reducing concentrations of toxic gases. Hence, vitiated air is replaced by clean or smoke-free air, which is either supplied mechanically or drawn in through the portals.

### ► GENERAL CLASSIFICATION OF VENTILATION SYSTEMS

#### Longitudinal Ventilation

Longitudinal systems ensure a longitudinal flow along the axis of the tunnel. Air may be introduced or removed from the tunnel at a limited number of points, such as portals or ventilation shafts.



Un exemple de ce type de système est celui qui emploie des accélérateurs installés en plafond pour produire le courant d'air requis à travers le tunnel, *figure 1*.

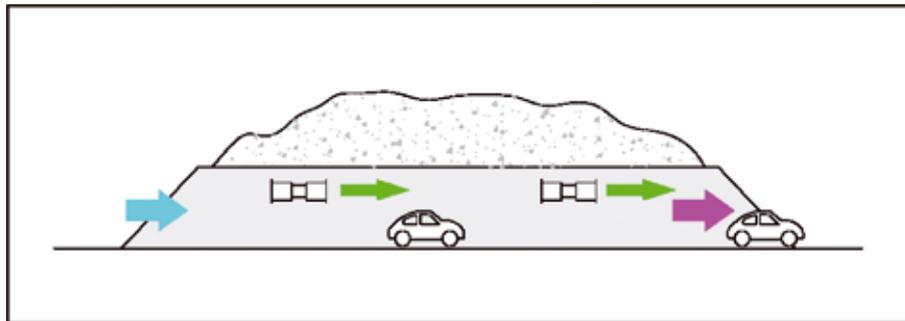


FIGURE 1 - VENTILATION LONGITUDINALE AVEC ACCÉLÉRATEURS

Le courant d'air longitudinal peut également être produit par des injections ponctuelles d'air, depuis un puits de ventilation par exemple. Si l'on n'impose pas de direction à l'injection ponctuelle, un courant d'air longitudinal peut se développer dans les deux directions, par exemple vers les deux têtes du tunnel. De façon alternative, l'injecteur Saccardo injecte le flux avec un angle plat dans l'espace de circulation afin de favoriser une direction de courant d'air prédéfinie dans le tunnel, voir *figure 2*.

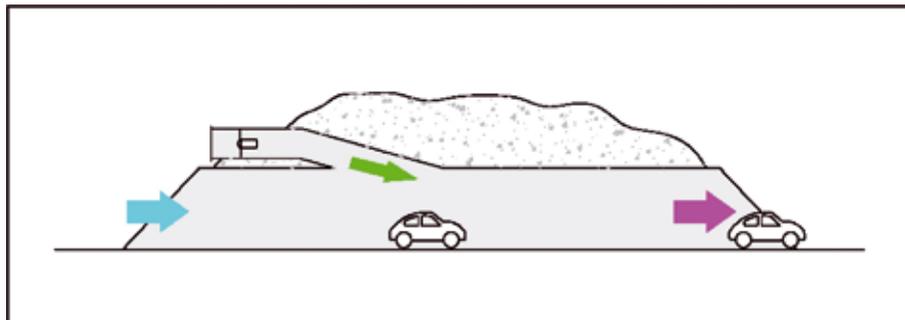


FIGURE 2 - VENTILATION LONGITUDINALE AVEC INJECTEUR SACCARDO

### Ventilation semi-transversale

Traditionnellement, on parle de systèmes de ventilation semi-transversaux lorsqu'en exploitation normale, de l'air est soit extrait, soit injecté de manière distribuée sur la longueur du tunnel, voir *figure 3, page suivante*. D'ordinaire, le débit d'extraction ou d'injection est constant sur toute la longueur du

An example of this type of system is that which employs ceiling mounted jet fans to produce the required airflow through the tunnel, *figure 1*.

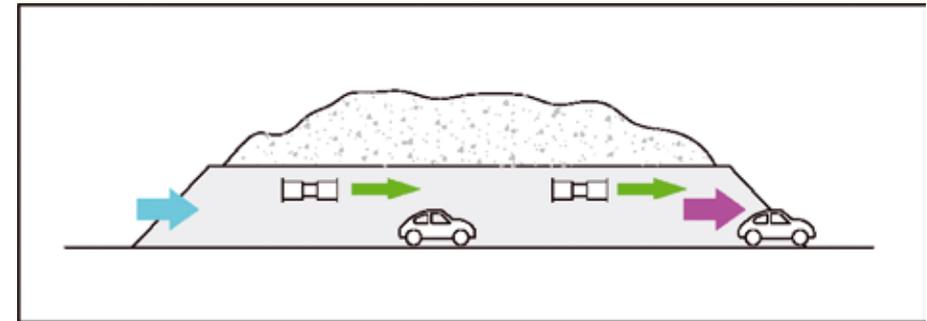


FIGURE 1 - LONGITUDINAL VENTILATION WITH JET FANS

Longitudinal flow may also be promoted using point-flow injections, through a vent shaft, for example. Without imposing a flow direction on the point-flow injection, a longitudinal flow may develop in both directions e.g. towards both tunnel portals. Alternatively, the Saccardo nozzle injects the flow at a flat angle into the traffic space in order to support one predefined flow direction in the tunnel, see *figure 2*.

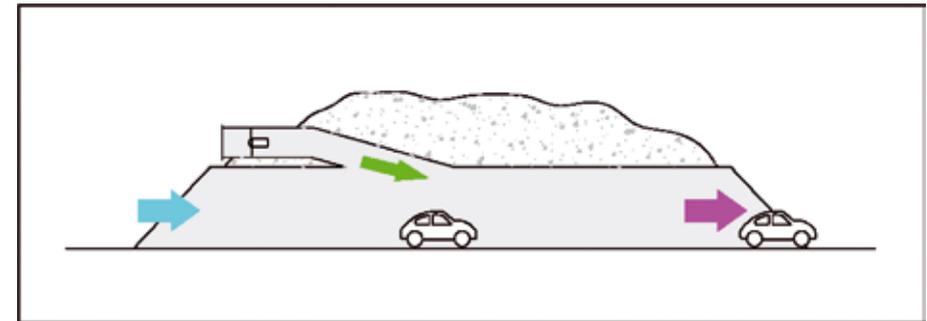


FIGURE 2 - LONGITUDINAL VENTILATION WITH SACCARDO NOZZLE

### Semi-transverse Ventilation

Traditionally semi-transverse ventilation systems are referred to when, in normal operation, flow is either extracted or injected in a distributed fashion over the length of the tunnel; see *figure 3, next page*. Typically, the extraction or injection flow rate is constant along the length of the tunnel. In describing semi-transverse



tunnel. Lorsqu'on décrit les systèmes de ventilation semi-transversaux, il est important de distinguer si l'air est extrait ou amené. En aspiration, les systèmes semi-transversaux de cette nature ne sont pas efficaces pour la maîtrise des fumées.

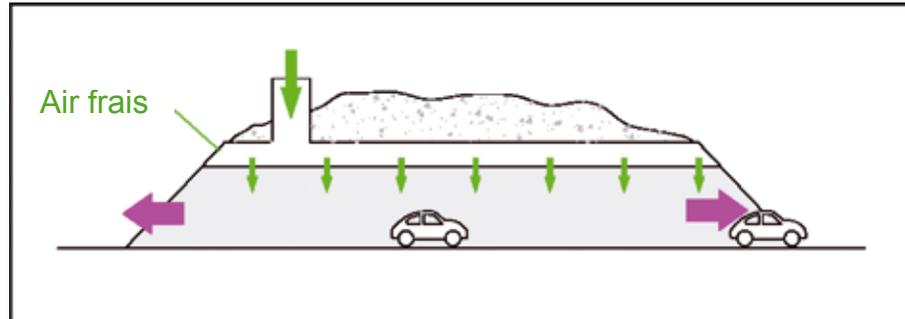


FIGURE 3 - VENTILATION SEMI-TRANSVERSALE EN CONDITION D'EXPLOITATION NORMALE : INJECTION D'AIR FRAIS

Les évolutions récentes des systèmes semi-transversaux recourent à des trappes de désenfumage télécommandées permettant l'extraction ponctuelle des fumées, voir [figure 4](#). Dans ce cas, seules les trappes de désenfumage situées à proximité de l'incendie sont ouvertes tandis que les autres sont fermées. Il est clair que l'efficacité du désenfumage est fortement augmentée si la vitesse longitudinale de l'air dans le tunnel peut être contrôlée dès le début de l'incendie, par exemple au moyen d'accélérateurs, évitant ainsi que les fumées se répandent au loin. Les fumées peuvent alors être extraites sur une courte distance à proximité de l'incendie. Cela évite l'inconvénient des systèmes semi-transversaux traditionnels où l'extraction se fait sur de longues sections de tunnel.

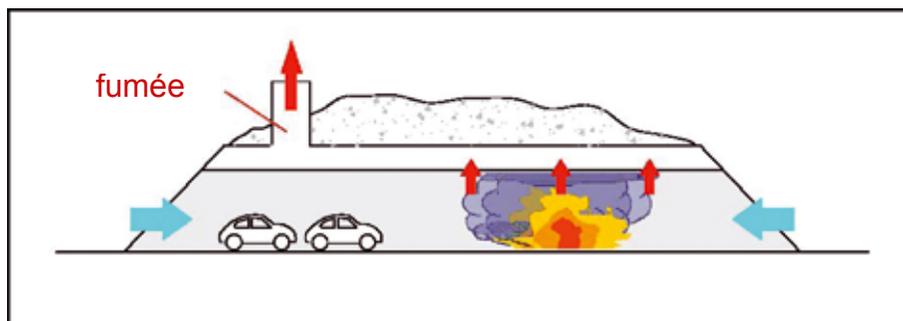


FIGURE 4 - VENTILATION SEMI-TRANSVERSALE AVEC TRAPPES DE DÉSENFUMAGE TÉLÉCOMMANDEES.  
[Note : En cas d'incendie, seules les trappes proches de l'incendie sont ouvertes. Toutes les autres sont fermées.]

ventilation systems, it is important to distinguish whether the air is extracted or supplied. Semi-transverse systems of this kind, in exhaust, are not efficient for smoke control.

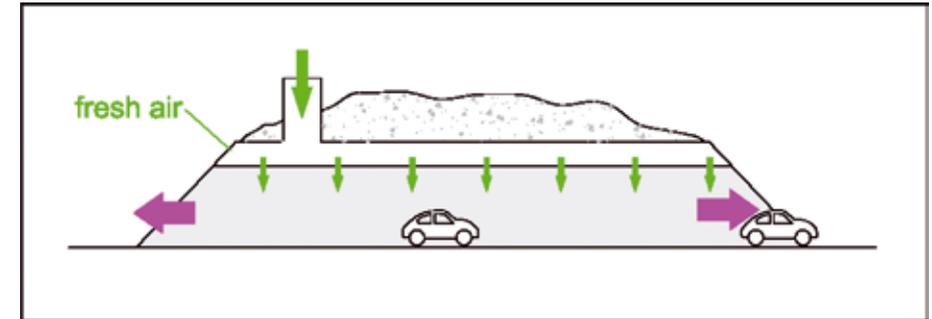


FIGURE 3 - SEMI-TRANSVERSE VENTILATION: DURING NORMAL OPERATING CONDITIONS; FRESH AIR INJECTION

Recent developments in semi-transverse systems apply remotely controlled dampers enabling point extraction of smoke, see [figure 4](#). In this case, only the dampers near to the fire are opened and the remaining ones are closed. Clearly, the efficiency of the smoke extraction is greatly increased if the longitudinal air velocity in the tunnel can be controlled from the beginning of the fire, e.g. by jet fans, thus avoiding extensive smoke spread. Smoke can then be extracted over a short distance near to the fire. This overcomes the shortcoming of traditional semi-transverse systems where extraction is performed over longer sections of tunnel.

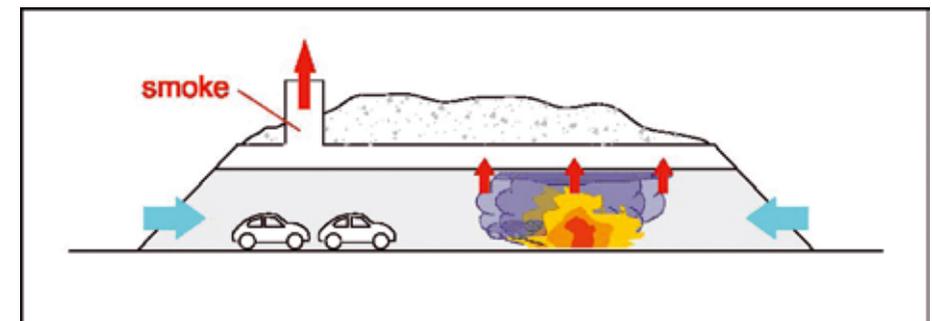


FIGURE 4. SEMI-TRANSVERSE VENTILATION WITH REMOTELY CONTROLLED DAMPERS.  
[Note: In case of fire, only the dampers near to the fire are opened. All others are closed.]



Les systèmes de ventilation semi-transversaux pourraient être équipés de ventilateurs réversibles, permettant l'injection d'air en mode normal et l'extraction en cas d'incendie. Il faudrait alors prendre en considération le temps que prend l'inversion des ventilateurs en cas d'urgence et l'efficacité globale du système pour la maîtrise des fumées. Pour l'extraction ponctuelle des fumées, des trappes de désenfumage télécommandées sont nécessaires. Pour l'extraction ponctuelle massive, *se reporter à la section "Extraction massive ponctuelle", page 30.*

### Ventilation transversale

Les systèmes transversaux utilisent une gaine d'air frais et une gaine d'air vicié pour distribuer l'air dans le tunnel et l'en extraire de manière uniforme. D'ordinaire, l'air est amené assez bas près de la chaussée et extrait le long du plafond du tunnel. Ceci est intéressant pour aspirer les fumées chaudes en cas d'incendie de véhicule, voir *figure 5.*

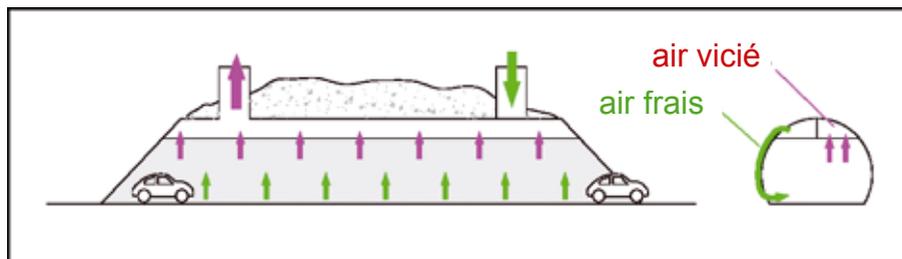


FIGURE 5 - SYSTÈME DE VENTILATION TRANSVERSALE  
AVEC AMENÉE ET EXTRACTION D'AIR UNIFORMES

Les évolutions récentes des systèmes transversaux incorporent des trappes de désenfumage télécommandées permettant l'extraction ponctuelle des fumées comme indiqué pour la ventilation semi-transversale, voir *figure 6, page suivante.* Le courant d'air longitudinal peut être contrôlé soit en ajoutant des accélérateurs dans le tunnel, soit à l'aide du système de ventilation dans les cantons de ventilation adjacents (dans les tunnels longs ayant plus d'un canton de ventilation) afin de créer un courant d'air dans la direction requise en appliquant des régimes de pression différents. Dans ce dernier cas, une analyse doit être faite car l'injection d'air frais ou l'extraction peuvent ne pas suffire pour contrôler le courant d'air longitudinal en cas de différence de pression entre les deux têtes. Au cours d'un incendie, l'apport d'air frais est parfois réduit le long du tunnel, par exemple pour préserver la stratification et créer une vitesse longitudinale en direction de l'incendie. Si le système le permet, l'amenée d'air frais peut être davantage restreinte dans le canton de l'incendie.

Semi-transverse ventilation systems could be equipped with reversible fans, allowing flow injection in normal mode and flow extraction in case of a fire. Consideration should be given to the time taken to reverse the fans in an emergency and the overall system efficiency for smoke control. For point smoke extraction, remote controlled dampers are needed. *See Section "Massive point extraction", page 31,* regarding massive point extraction (single point extraction).

### Transverse Ventilation

Transverse systems use both a supply and an exhaust air duct to uniformly distribute air to and remove air from a tunnel. Typically, air is supplied at low level near the roadway and extracted along the tunnel ceiling. This is advantageous for exhausting hot smoke in the event of a vehicle fire, see *figure 5.*

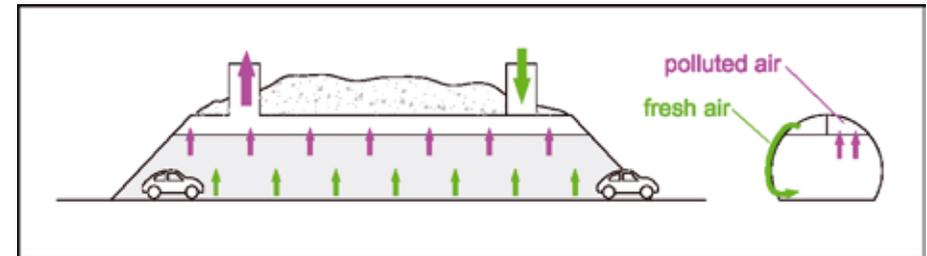


FIGURE 5 - TRANSVERSE VENTILATION SYSTEM  
WITH UNIFORM SUPPLY AND EXTRACT OF AIR.

Recent developments of transverse systems incorporate remotely controlled dampers enabling point smoke extraction as shown for the semi-transverse ventilation, see *figure 6, next page.* The longitudinal air flow can be controlled either by additional jet fans in the tunnel or by using the ventilation system in adjacent ventilation sections (in long tunnels with more than one ventilation section) to establish an airflow in the required direction by applying different pressure regimes. In the latter case, an analysis has to be done since fresh air inlet or extraction may not be sufficient to control the longitudinal velocity in case of pressure difference between both portals. During a fire the fresh air supply is sometimes reduced along the tunnel length e.g. to preserve stratification and to create a longitudinal velocity towards the fire. Where the capability exists, the supply may be further restricted in the fire section.

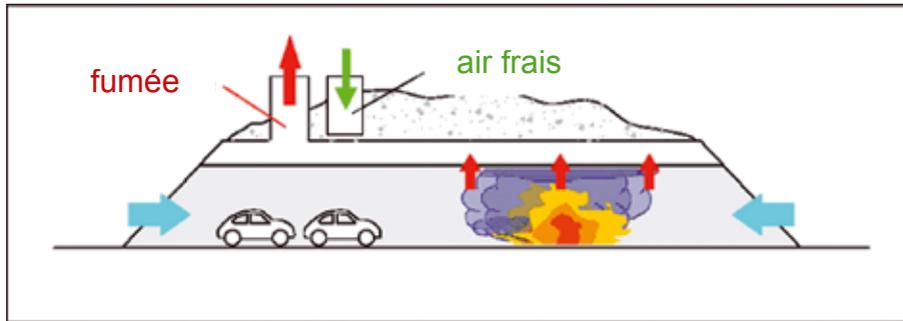


FIGURE 6 - VENTILATION TRANSVERSALE AVEC TRAPPES DE DÉSENFUMAGE TÉLÉCOMMANDÉES.  
[Note : En cas d'incendie, seules les trappes proches de l'incendie sont ouvertes. Toutes les autres sont fermées.]

Dans certains systèmes de ventilation transversale, la gaine d'air frais peut être équipée d'un ventilateur réversible afin de fournir une capacité d'extraction supplémentaire en mode d'incident.

### Extraction massive ponctuelle

L'extraction massive ponctuelle est obtenue en extrayant de grandes quantités d'air directement du tunnel depuis un point déterminé (voir AIPCR 1999 [1], p. 181).

L'extraction ponctuelle peut créer des courants d'air longitudinaux venant des deux côtés et dirigés vers le point d'extraction (voir [figure 7](#)). Il peut être nécessaire d'ajouter des accélérateurs pour garantir les écoulements d'air souhaités.

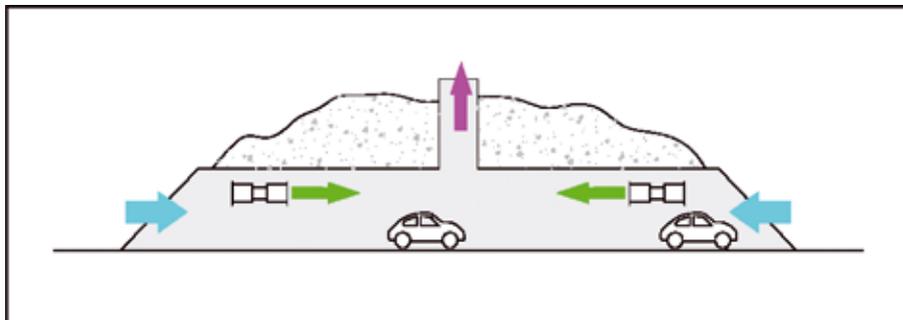


FIGURE 7 - SYSTÈME D'EXTRACTION MASSIVE PONCTUELLE

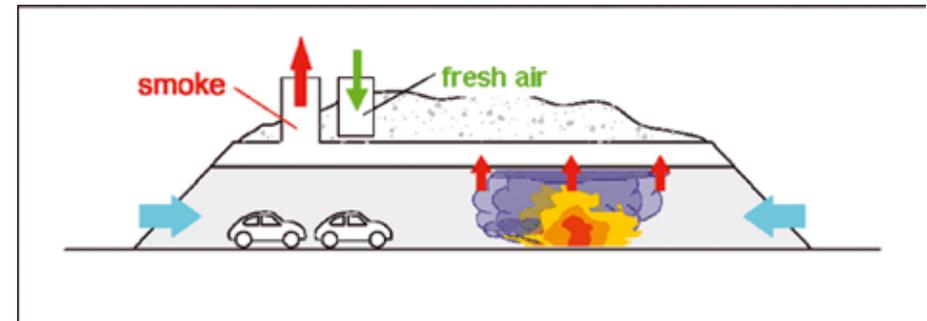


FIGURE 6 - TRANSVERSE VENTILATION WITH REMOTELY CONTROLLED DAMPERS.  
[Note: In case of fire, only the dampers near to the fire are opened. All others are closed.]

In some transverse ventilation systems the fresh air duct might have a reversible fan in order to provide additional extraction capability in the incident mode.

### Massive point extraction

Massive point extraction is obtained by extracting high quantities of air at one fixed point directly from the tunnel. (see 1999 PIARC report [1], p. 181).

Point-flow extraction may lead to longitudinal flow from both sides towards the extraction point (see [figure 7](#)). Additional jet fans might be necessary to ensure the desired flow pattern.

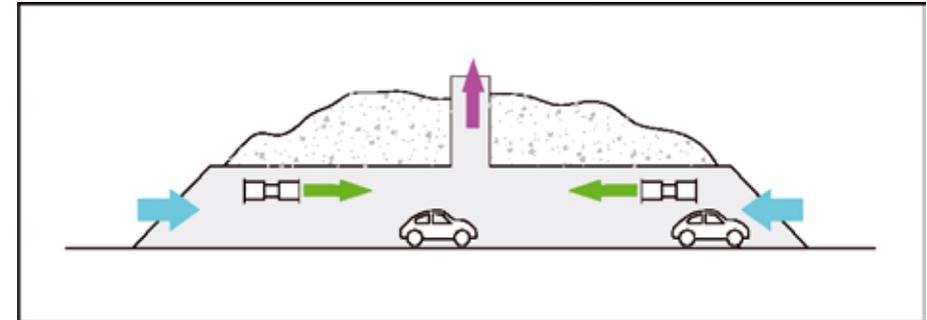


FIGURE 7 - MASSIVE POINT EXTRACTION SYSTEM



## Systèmes de ventilation combinés

Un tunnel peut intégrer plusieurs méthodes de ventilation. Ainsi, un tunnel peut être subdivisé en plusieurs cantons sur sa longueur, par exemple un canton avec des accélérateurs pour la ventilation longitudinale et un autre avec une ventilation transversale. Dans de tels cas, les systèmes de ventilation dans les cantons proches de l'incendie sont utilisés pour optimiser la gestion des fumées.

### OBJECTIFS DE LA COMMANDE DE LA VENTILATION

#### ▶ MODES D'EXPLOITATION

Le système de ventilation du tunnel devrait assurer une qualité d'air suffisante en exploitation normale ainsi que lors des activités de maintenance, et permettre la gestion des fumées souhaitée en cas d'incendie. De plus, les itinéraires d'évacuation devraient rester libres de toute fumée. Toutefois, lors du choix et de l'exploitation d'un système de ventilation, il n'est pas possible de considérer séparément l'exploitation normale et la gestion des fumées. Les états intermédiaires entre ces deux situations doivent également être pris en considération.

Les modes d'exploitation distincts suivants doivent être considérés :

- Exploitation normale avec trafic
- Exploitation avec maintenance dans le tunnel
- Exploitation d'urgence avec gestion des fumées dans le tube où a lieu l'incendie
- Exploitation d'urgence avec ventilation du tube utilisé pour l'évacuation (qui peut être le tube sans incident d'un tunnel bitube ou une galerie dédiée à l'évacuation. Les itinéraires d'évacuation autres que le tube utilisé pour l'évacuation peuvent également avoir des systèmes de désenfumage. Voir *Stratégies de gestion des fumées pour la phase d'auto-sauvetage*, page 42).

Sauf mention contraire, les indications du présent rapport relatives à l'exploitation d'urgence concernent le tube où a lieu l'incendie et non le tube utilisé pour l'évacuation.

#### ▶ EXPLOITATION NORMALE

En exploitation normale, il est indispensable de maintenir le niveau de polluants dans chaque section du tunnel au-dessous des valeurs de seuil définies pour la

## Combined Ventilation Systems

A tunnel can include several ventilation methods. For example, the length of the tunnel may be subdivided into sections e.g. one section with jet fans for longitudinal ventilation and another section with transverse ventilation. In such cases the ventilation systems in the sections adjacent to the fire incident location would be used to optimize the smoke management.

### OBJECTIVES FOR VENTILATION CONTROL

#### ▶ OPERATION MODES

The tunnel ventilation system should ensure adequate air quality during normal operation and maintenance activities, as well as providing the desired smoke management in case of fire. Moreover, the escape routes should be kept free from smoke. However, when selecting and operating a ventilation system, normal operation and smoke management cannot be considered independently. Intermediate states between the two also have to be taken into account.

The following distinct operation modes are to be considered:

- normal operation with traffic flow,
- operation with maintenance in tunnel,
- emergency operation with smoke management in tube with fire,
- emergency operation with ventilation of escape tube (which may refer to the non-incident bore of a twin bore tunnel or a dedicated escape tube. Escape routes other than the escape tube may also have smoke control systems. *See "Smoke-management strategies for the self-rescue phase", page 43).*

Unless described specifically otherwise, statements in this report on emergency operation concern the tube with the fire and not the escape tube.

#### ▶ NORMAL OPERATION

During normal operation, it is required to keep the pollutant level below defined threshold values for visibility due to particulates, or toxic gases such as carbon