



TUNNELS ROUTIERS: STRATÉGIES D'EXPLOITATION DE LA VENTILATION EN SITUATION D'URGENCE

ROAD TUNNELS: OPERATIONAL STRATEGIES FOR EMERGENCY VENTILATION

Comité technique AIPCR 3.3 Exploitation des tunnels routiers

PIARC Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation

Comité technique AIPCR 3.3 Exploitation des tunnels routiers
PIARC Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation

TUNNELS ROUTIERS: STRATÉGIES D'EXPLOITATION
DE LA VENTILATION EN SITUATION D'URGENCE

ROAD TUNNELS: OPERATIONAL STRATEGIES
FOR EMERGENCY VENTILATION



A propos de l'AIPCR

L'Association mondiale de la Route (AIPCR) est une association à but non lucratif fondée en 1909 pour favoriser la coopération internationale et les progrès dans le domaine de la route et du transport routier.

L'étude faisant l'objet de ce rapport a été définie dans le Plan stratégique 2004-2007 approuvé par le Conseil de l'AIPCR dont les membres sont des représentants des gouvernements nationaux membres. Les membres du Comité technique responsable de ce rapport ont été nommés par les gouvernements nationaux membres pour leurs compétences spécifiques.

Les opinions, constatations, conclusions et recommandations exprimées dans cette publication sont celles des auteurs et ne sont pas nécessairement celles de la société/organisme auquel ils appartiennent.

N° ISBN : 2-84060-234-2

*Ce rapport est disponible sur le site de l'Association mondiale de la Route (AIPCR)
<http://www.piarc.org>*

Tous droits réservés. © Association mondiale de la Route (AIPCR).

*Association mondiale de la Route (AIPCR)
La Grande Arche, Paroi nord, Niveau 5
92055 La Défense cedex, FRANCE*

Statements

The World Road Association (PIARC) is a nonprofit organisation established in 1909 to improve international co-operation and to foster progress in the field of roads and road transport.

The study that is the subject of this report was defined in the PIARC Strategic Plan 2004 – 2007 approved by the Council of the World Road Association, whose members and representatives of the member national governments. The members of the Technical Committee responsible for this report were nominated by the member national governments for their special competences.

Any opinions, findings, conclusions and recommendations expressed in this publication are those of the authors and do not necessarily reflect the views of their parent organizations or agencies.

International Standard Book Number 2-84060-234-2

*This report is available from the internet site of the World Road Association (PIARC)
<http://www.piarc.org>*

Copyright by the World Road Association. All rights reserved.

*World Road Association (PIARC)
La Grande Arche, Paroi nord, Niveau 5
92055 La Défense cedex, FRANCE*



Le présent rapport a été préparé par le Groupe de travail n°6 - Ventilation et maîtrise des incendies du comité technique C3.3 – Exploitation des tunnels routiers de l'Association mondiale de la route (AIPCR). Il a été approuvé par ce comité.

Les principaux contributeurs à l'élaboration de ce rapport sont :

Norman RHODES (Royaume-Uni), responsable :

*Martin ALLEMANN (Suisse)
Rune BRANDT (Danemark)
Pierre CARLOTTI (France)
Ignacio DEL REY (Espagne)
Miodrag DRAKULIĆ (Croatie)
François DUPONT (France)
Massimiliano FRESTA (Italie)
Hans HUIJBEN (Pays-Bas)
Eddy JACQUES (Belgique)
Miroslav NOVAK (République tchèque)
Stojan PETELIN (Slovénie)
Tomas SANDMAN (Suède)
Peter STURM (Autriche)
João VIEGAS (Portugal)
Franz ZUMSTEG (Suisse)*

Ont assuré le contrôle à titre de tiers experts : John DAY (Suisse), Bill GRAY (Royaume-Uni).

Les rédacteurs de ce rapport sont : Art BENDELIUS (Etats-Unis) pour la version anglaise, Martin ALLEMANN & Alain JEANNERET pour la version française.

La traduction française de l'original anglais a été réalisée par l'Office Fédéral des Routes de Suisse (Martin ALLEMANN et Alain JEANNERET).

Art BENDELIUS (Etats-Unis), en tant qu'animateur, était responsable de la production du présent rapport au sein du groupe de travail, et Pierre SCHMITZ (Belgique), en tant qu'un des secrétaires, était responsable du contrôle de qualité du rapport au sein du Comité technique C3.3.

Le groupe de travail était dirigé par Art BENDELIUS (Etats-Unis), animateur, avec Norman RHODES (Royaume-Uni) en tant que secrétaire, et Alexandre DEBS (Canada) en tant que webmestre.

Le comité technique était présidé par Didier LACROIX (France). Alan WEST (Royaume-Uni), Pierre SCHMITZ et Manuel ROMANA-RUIZ en étaient respectivement les secrétaires francophone, anglophone et hispanophone.

This report has been prepared by Working Group 6 - Ventilation and Fire Control of Technical Committee C3.3 - Road Tunnel Operation of the World Road Association (PIARC). It has been approved by this Committee.

The principal contributors to the preparation of this report were:

Norman RHODES (United Kingdom), Task Leader

*Martin ALLEMANN (Switzerland)
Rune BRANDT (Denmark)
Pierre CARLOTTI (France)
Ignacio DEL REY (Spain)
Miodrag DRAKULIĆ (Croatia)
François DUPONT (France)
Massimiliano FRESTA (Italy)
Hans HUIJBEN (The Netherlands)
Eddy JACQUES (Belgium)
Miroslav NOVAK (Czech Republic)
Stojan PETELIN (Slovenia)
Tomas SANDMAN (Sweden)
Peter STURM (Austria)
João VIEGAS (Portugal)
Franz ZUMSTEG (Switzerland)*

The peer reviews were performed by John DAY (Switzerland) and Bill GRAY (United Kingdom).

The editors of this report were Art BENDELIUS (United States, English version) and Martin ALLEMANN (Switzerland, French version) & Alain JEANNERET (Switzerland, French version).

The translation into French of the original version was produced by the Swiss Federal Roads Office (Martin ALLEMANN & Alain JEANNERET).

Art BENDELIUS (United States), as the Animateur, was responsible for the production of this report within Working Group 6 and Pierre SCHMITZ (Belgium), as one of the Secretaries, was responsible within the Technical Committee C3.3 for the quality control of this report.

The Working Group was led by Art BENDELIUS (United States) as facilitator with Norman RHODES (United Kingdom) as secretary and Alexandre DEBS (Canada) as webmaster.

The Technical Committee was chaired by Didier LACROIX (France) with Alan WEST (United Kingdom) as the English-speaking secretary, Pierre SCHMITZ (Belgium) as the French-speaking secretary and Manuel ROMANA-RUIZ (Spain) as the Spanish-speaking secretary.



Les membres suivants du groupe de travail ont été impliqués dans le processus de contrôle et d'approbation du présent rapport :

*Roberto ARDITI (Italie)
Carlo BARBETTA (Italie)
Willy DE LATHAUWER (Belgique)
Arnold DIX (Australie)
Vincenzo FERRO (Italie)
Alfred HAACK (Allemagne)
Ruth Gunlaug HAUG (Norvège)
Marko JÄRVINEN (Finlande)
Arthur KABUYA (Belgique)
Dieter TETZNER (Allemagne)*

The following members of the Working Group were directly involved in the review and approval process for this report:

*Roberto ARDITI (Italy)
Carlo BARBETTA (Italy)
Willy DE LATHAUWER (Belgium)
Arnold DIX (Australia)
Vincenzo FERRO (Italy)
Alfred HAACK (Germany)
Ruth Gunlaug HAUG (Norway)
Marko JÄRVINEN (Finland)
Arthur KABUYA (Belgium)
Dieter TETZNER (Germany)*



RÉSUMÉ 12

CONTEXTE 16

 TRAVAUX PRÉCÉDEMMENT RÉALISÉS PAR L'AIPCR..... 16

 DIRECTIVE DE L'UNION EUROPÉENNE 2004/54/CE 18

 TEXTES NATIONAUX..... 20

CLASSIFICATION DES SYSTÈMES DE VENTILATION 20

 INTRODUCTION 20

 PRINCIPES AÉRODYNAMIQUES DE BASE 22

 CLASSIFICATION GÉNÉRALE DES SYSTÈMES DE VENTILATION 22

Ventilation longitudinale 22

Ventilation semi-transversale 24

Ventilation transversale 28

Extraction massive ponctuelle 30

Systèmes de ventilation combinés..... 32

OBJECTIFS DE LA COMMANDE DE LA VENTILATION 32

 MODES D'EXPLOITATION 32

 EXPLOITATION NORMALE 32

 EXPLOITATION EN SITUATION D'URGENCE 34

Aspects généraux 34

Phases 36

Influence de la ventilation sur la répartition et la stratification des fumées 40

Influence du trafic sur la stratégie de ventilation..... 42

Stratégies de gestion des fumées pour la phase d'auto-sauvetage 42

Ventilation au cours des phases de sauvetage assisté et de lutte contre l'incendie..... 52



EXECUTIVE SUMMARY..... 13

BACKGROUND 17

 PREVIOUS WORK BY PIARC..... 17

 EU-DIRECTIVE 2004/54/EC 19

 NATIONAL GUIDELINES..... 21

CLASSIFICATION OF VENTILATION SYSTEMS 21

 INTRODUCTION 21

 BASIC AERODYNAMIC PRINCIPLES 23

 GENERAL CLASSIFICATION OF VENTILATION SYSTEMS 23

Longitudinal Ventilation..... 23

Semi-transverse Ventilation 25

Transverse Ventilation..... 29

Massive point extraction..... 31

Combined Ventilation Systems 33

OBJECTIVES FOR VENTILATION CONTROL..... 33

 OPERATION MODES 33

 NORMAL OPERATION 33

 EMERGENCY OPERATION..... 35

General aspects..... 35

Phases 37

Influence of Ventilation on Smoke Distribution and Stratification..... 41

Influence of Traffic on Ventilation Strategy..... 43

Smoke-management strategies for the self-rescue phase..... 43

Ventilation during the assisted rescuing and fire-fighting phases..... 53



RÉACTION DES SYSTÈMES DE COMMANDE DE LA VENTILATION	
EN CAS D'INCENDIE	52
INTRODUCTION	52
IMPLICATIONS DE L'EXPLOITATION NORMALE	54
VUE D'ENSEMBLE DU PROCESSUS DE COMMANDE	56
<i>Plans d'urgence</i>	60
<i>Principe de la réaction de la ventilation</i>	62
DONNÉES DÉFINISSANT LES SCÉNARIOS D'INCENDIE ET DE VENTILATION	64
<i>Détection des incendies</i>	64
<i>Vitesse du courant d'air dans le tunnel (anémomètre)</i>	66
<i>Données sur les systèmes de ventilation</i>	68
<i>Situation du trafic</i>	68
<i>Autres données</i>	70
MISE EN ŒUVRE DE LA COMMANDE EN CAS D'INCENDIE	70
 ESSAIS	 74
ESSAIS DE MISE EN SERVICE	74
ESSAIS PÉRIODIQUES DU SYSTÈME	76
ESSAIS DE SYSTÈME BASÉS SUR DES MODÉLISATIONS	78
 MAINTENANCE	 78
 CONCLUSIONS	 80
 RÉFÉRENCES	 82
 GLOSSAIRE	 86
 ANNEXE A - PRATIQUES ADOPTÉES DANS DIFFÉRENTS PAYS	 90
A.1 - GÉNÉRALITÉS	90
A.2 – VENTILATION LONGITUDINALE	90
<i>A.2.1 Trafic bidirectionnel</i>	90
<i>A.2.2 Trafic unidirectionnel sans congestion</i>	92
<i>A.2.3 Trafic unidirectionnel avec congestion</i>	92
A3 - VENTILATION SEMI-TRANSVERSALE	94
A4 - VENTILATION TRANSVERSALE AVEC TRAPPES DE DÉSENFUMAGE	
TÉLÉCOMMANDÉES	94
<i>Capacité d'extraction du système de ventilation</i>	94
<i>Dimensions des trappes ouvertes</i>	94
 ANNEXE B - RECOMMANDATIONS SUR LES TUNNELS ROUTIERS	
DANS LE MONDE	96

RESPONSE OF VENTILATION CONTROL SYSTEMS TO FIRE	53
INTRODUCTION	53
IMPLICATIONS OF NORMAL OPERATION	55
OVERVIEW OF THE CONTROL PROCESS	57
<i>Emergency plans</i>	61
<i>Ventilation Response Principle</i>	63
INPUT DATA DEFINING FIRE AND VENTILATION SCENARIO	65
<i>Fire Detection</i>	65
<i>Tunnel Air Flow Velocity (Anemometer)</i>	67
<i>Ventilation Systems Data</i>	69
<i>Traffic Situation</i>	69
<i>Further Data</i>	71
IMPLEMENTATION OF CONTROL PROCEDURE IN THE CASE OF FIRE	71
 TESTING	 75
COMMISSIONING TESTS	75
PERIODIC SYSTEM TESTS	77
MODEL BASED SYSTEM TESTS	79
 MAINTENANCE	 79
 CONCLUSIONS	 81
 REFERENCES	 83
 GLOSSARY	 87
 APPENDIX A - PRACTICES ADOPTED IN SEVERAL COUNTRIES	 91
A.1. GENERAL	91
A.2. LONGITUDINAL VENTILATION	91
<i>A.2.1. Bidirectional Traffic</i>	91
<i>A.2.2. Unidirectional Traffic Without Congestion</i>	93
<i>A.2.3. Unidirectional Traffic With Congestion</i>	93
A.3. SEMI-TRANSVERSE SYSTEMS	95
A.4. TRANSVERSE VENTILATION WITH CONTROLLABLE DAMPERS	95
<i>Extraction capacity of the ventilation system</i>	95
<i>Size of the open damper(s)</i>	95
 APPENDIX B - WORLDWIDE ROAD TUNNEL GUIDELINES	 97



RÉSUMÉ

Le présent document est un rapport préparé par le groupe de travail n° 6 « Ventilation et maîtrise des incendies » du comité technique C3.3 'Exploitation des tunnels routiers' de l'Association mondiale de la Route (AIPCR). Ce rapport fournit des informations sur l'exploitation des systèmes de ventilation des tunnels dans les cas d'urgence, principalement ceux causés par un incendie.

En exploitation normale, la ventilation est nécessaire pour assurer la propreté de l'air ambiant et préserver la visibilité dans le tunnel, en évitant l'accumulation de gaz polluants et de particules. En cas d'incendie, l'exploitation de la ventilation doit être modifiée pour passer de son mode normal à un mode qui optimise les possibilités d'évacuation des usagers du tunnel et d'intervention sûre des services d'urgence. La stratégie à adopter dépend de la géométrie spécifique du tunnel, de la densité du trafic et de son mode de circulation uni ou bidirectionnel.

Après une discussion des travaux antérieurs de l'AIPCR et quelques remarques sur la directive européenne de 2004 et les recommandations nationales concernant la ventilation des tunnels, le rapport présente des informations sur les types de système de ventilation communément utilisés, tels que les systèmes longitudinal, transversal et semi-transversal. Les objectifs visés dans l'idéal pour la maîtrise des fumées dans ces différents types de tunnel sont ensuite traités, et le mode de commande préféré est présenté. Ceci peut inclure, par exemple, le contrôle de la vitesse du courant d'air longitudinal, une fonction qui peut ne pas être disponible dans tous les cas, mais qui devrait normalement être prévue dans un ouvrage nouveau.

Les principes de la commande de la ventilation sont alors décrits dans leurs grandes lignes, et quelques remarques sur la maintenance et les essais de vérification suivent.

EXECUTIVE SUMMARY

This document presents a report prepared by Working Group 6 – 'Ventilation and Fire Control' of Technical Committee C3.3 – 'Road Tunnel Operation' of the World Road Association (PIARC). The report provides information on the operation of tunnel ventilation systems in emergencies, principally those caused by a fire event.

During normal operation ventilation is required to provide a clean air environment and to maintain visibility in the tunnel by preventing the accumulation of pollutants and particulates. In the event of a fire, the ventilation operation needs to be changed from its normal mode to one which optimises the possibility for tunnel users to escape and the safe intervention of the emergency services. The strategy to be adopted depends on the particular tunnel geometry, traffic density and whether the traffic is bidirectional or unidirectional.

Following a discussion of previous work by PIARC and some remarks on the 2004 EU directive and National guidelines for tunnel ventilation, the report presents information on the types of ventilation system commonly used, such as longitudinal, transverse and semi-transverse. The ideal objectives for smoke control in these different types of tunnel are then addressed, and the preferred mode of control established. This may include, for example, control of the longitudinal air flow velocity, a capability that may not be available in all cases, but would normally be provided in a new construction.

The main principles of ventilation control are then outlined, and some remarks on maintenance and testing follow.



I N T R O D U C T I O N

La ventilation dans les tunnels est requise pour l'exploitation en situation normale comme en situation d'urgence. En situation normale, elle a pour but d'assurer la propreté de l'air ambiant et de préserver la visibilité dans le tunnel en empêchant l'accumulation de gaz polluants et de particules. En situation d'urgence, la ventilation est requise pour influencer sur l'écoulement des fumées et des produits de combustion afin de créer un environnement plus sûr permettant aux usagers du tunnel de s'échapper et aux services d'urgence d'intervenir. Le présent document constitue un guide des systèmes de ventilation des tunnels et de leur exploitation en situation d'urgence.

La ventilation naturelle peut s'avérer suffisante pour l'exploitation normale, lorsque le courant d'air généré par la circulation des véhicules ou par les conditions météorologiques différentes aux têtes assure une ventilation suffisante pour conserver une qualité de l'air acceptable. La longueur du tunnel, la densité du trafic et la nature du trafic (bidirectionnel ou unidirectionnel, avec ou sans congestion) sont quelques-uns des facteurs qui déterminent si les exigences de la ventilation normale peuvent être satisfaites par des moyens naturels ou si une ventilation mécanique est requise.

Ces facteurs déterminent également les exigences applicables à la ventilation mécanique en situation d'urgence, en particulier les risques créés par un incendie. La maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels présente implicitement deux volets, le premier que l'on pourrait appeler passif, et le second actif :

- Les aspects passifs concernent la conception et la construction de nouveaux tunnels ou la rénovation des tunnels existants. La maintenance de l'ensemble du système doit en garantir le bon fonctionnement.
- Les aspects actifs regroupent toutes les activités opérationnelles faisant appel à la notion de « *commande* » au véritable sens du terme. Dans le présent rapport, ceci concerne plus spécifiquement la ventilation mécanique. L'établissement de procédures opérationnelles et la formation du personnel d'exploitation revêtent à cet égard la plus haute importance.

La conception du système de ventilation d'urgence exige de déterminer l'incendie potentiel et la menace représentée par les fumées en termes de visibilité, de température et d'effets de toxicité. C'est pourquoi, en fonction de l'aménagement du tunnel, le concepteur doit tenir compte :

I N T R O D U C T I O N

Ventilation in tunnels is required for normal and emergency operation. During normal operation its purpose is to provide a clean air environment and to maintain visibility in the tunnel by preventing the accumulation of pollutants and particulates. During emergency operation ventilation is needed to influence the flow of smoke and combustion products so as to create a safer environment for tunnel users to escape and for emergency services to intervene. This document presents a guide to tunnel ventilation systems and their operation during emergency conditions.

Natural ventilation may be sufficient for normal operation, when the airflow generated by the moving vehicles or due to different meteorological conditions at the portals provides sufficient ventilation to maintain acceptable air quality. The tunnel length, traffic density, and the direction of traffic movement (i.e. bidirectional or unidirectional; with or without traffic congestion) are some of the factors that determine whether the normal ventilation requirements can be achieved by natural means or whether mechanical ventilation is required.

These factors also determine the requirements for mechanical ventilation during emergency operations and in particular the hazards created by a fire. Fire and smoke control in tunnels deals implicitly with two aspects, the first might be termed passive, and the second one active:

- passive aspects concern design and construction of new tunnels or renovation of existing tunnels. Maintenance of the entire system has to assure its proper functionality.
- active aspects would include all operational activity where the word "*control*" is used in the proper meaning. In the present report, this addresses more specifically the mechanical ventilation. The establishment of operational procedures and training of the operational personnel is most important.

The emergency ventilation-system design requires the determination of the potential fire and smoke threat in terms of visibility, temperature, and toxicity effects. Therefore, given the layout of the tunnel, the designer has to consider:



- des caractéristiques du trafic (débit escompté, type de véhicules et charges combustibles) ;
- des moyens pour sauver les usagers du tunnel en conservant un espace sans fumée et en fournissant des dispositifs d'évacuation suffisants pour l'auto-sauvetage, ainsi que pour faciliter l'intervention des services d'urgence ;
- de la capacité minimale de ventilation et/ou d'extraction pour faire face au scénario d'incendie de dimensionnement ;
- des autres installations de sécurité telles qu'itinéraires d'évacuation, portes, passages et équipements divers, caméras vidéo, téléphones, systèmes fixes lutte contre l'incendie, extincteurs et circuits de communication ;
- des conditions météorologiques aux têtes qui peuvent créer, à cause de différences de pression, des vitesses très importantes de courant d'air naturel à l'intérieur du tunnel.

Les stratégies optimales pour l'exploitation de la ventilation dans les tunnels doivent tenir compte des conditions réelles de l'incendie et de son évolution dans le temps, étant entendu que la situation d'exploitation normale constitue le point de départ du déclenchement de l'intervention d'urgence. Le but ultime de la maîtrise des fumées serait de parvenir à un système capable de prendre les bonnes décisions en ligne et de donner des instructions à tous les services de sauvetage en fonction de la situation effective. Cependant, en raison de la complexité et de la diversité des risques d'incendie, une maîtrise optimale est sans doute inaccessible, dans l'état actuel des connaissances et de la technologie. De ce fait, il convient d'élaborer des stratégies basées sur des plans et procédures d'intervention prédéterminés faisant appel aux connaissances et aux équipements disponibles.

CONTEXTE

▶ TRAVAUX PRÉCÉDEMMENT RÉALISÉS PAR L'AIPCR

La plus grande partie du rapport AIPCR de 1999 *Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers* [1] traite des aspects de conception esquissés ci-dessus. Il formule des règles et des recommandations, relate des expériences faites avec d'autres tunnels et introduit diverses hypothèses pour calculer et modéliser des incendies hypothétiques.

Le rapport de 1999 [1] introduit également la question de la commande active des systèmes de ventilation en indiquant : « *Les développements récents de tels essais (d'incendie) montrent que l'efficacité de la ventilation est à la fois liée*

- the characteristics of the traffic (expected flow, type of vehicles and combustible load);
- the means to safeguard the tunnel users by keeping a smoke-free area and providing sufficient exit facilities for self-rescue, and to support the responding emergency services;
- the minimum ventilation and/or extraction capacity to cope with the design fire scenario;
- other safety facilities such as egress routes, doors, passage ways and various equipment, video cameras, phone facilities, fixed fire suppression systems, fire extinguishers, and communication circuits;
- meteorological conditions at the portals, that may create, through pressure difference, very important natural air flow velocities inside the tunnel

Optimal strategies for the operation of tunnel ventilation need to consider the real fire situation and its development with time, noting that the normal operating condition is the starting point for the initiation of the emergency response. The ultimate goal of smoke control would be the achievement of a system that is capable of taking the correct on-line decisions and of instructing all rescue services as a function of the actual situation. However, due to the complexity and diversity of fire hazards, optimal control is perhaps beyond the reach of the actual state of knowledge and technology. Hence, strategies based on predefined intervention plans and procedures using the available knowledge and equipment must be developed.

BACKGROUND

▶ PREVIOUS WORK BY PIARC

The main part of the 1999 PIARC report *Fire and Smoke Control in Road Tunnels* [1] deals with the design aspects outlined above. It formulates rules and recommendations, relates experience with other tunnels and introduces various assumptions for calculating and modelling hypothetical fires.

The 1999 report [1] introduces also the subject of the active control of ventilation systems by stating: “*The recent developments of such (fire) tests show that the efficiency of the ventilation is both linked to its quantitative capacity and the way it is operated. As this second point is never treated by recommendations or*



à sa capacité quantitative et à la manière dont elle est exploitée. Ce deuxième point n'étant jamais traité par des recommandations ou des réglementations, des développements spécifiques sont nécessaires pour déterminer les réactions optimales adaptées à l'incendie. » Le présent document tente d'aborder cette question de la commande du système de ventilation.

► DIRECTIVE DE L'UNION EUROPÉENNE 2004/54/CE

L'importance de la ventilation et de sa commande a été reconnue dans la récente directive de l'UE concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier trans-européen [2], qui formule des exigences dans deux domaines pertinents pour le présent rapport : l'exploitation et la ventilation.

Cette directive définit le rôle du gestionnaire du tunnel dont les tâches principales consistent à garantir la sécurité des usagers et des opérateurs tant en situation normale (prévention) qu'en cas d'incident, à surveiller l'efficacité du fonctionnement de toutes les installations (y compris la ventilation, l'éclairage, etc.) en exploitation normale, et à les ajuster selon les besoins en cas d'incident et à veiller à la bonne maintenance de toutes les installations structurelles et électromécaniques. En phase de conception, le gestionnaire du tunnel (ou s'il n'a pas été désigné, le concepteur et le maître d'ouvrage) doit travailler en étroite collaboration avec les services d'intervention pour élaborer des plans d'intervention d'urgence, ainsi qu'avec le concepteur, puisque les systèmes de tunnels doivent permettre les modes d'exploitation requis lors de réponses normales et dégradées. Il existe également des interfaces avec les services publics, les fournisseurs, etc.

En ce qui concerne la ventilation, la directive de l'UE exige que les systèmes maîtrisent les polluants émis par les véhicules routiers dans des conditions de trafic normales et en cas de congestion, et maîtrisent la chaleur et les fumées en cas d'incendie. Elle rend obligatoire un système de ventilation mécanique pour les tunnels de plus de 1000 m de long ayant un volume de trafic quotidien supérieur à 2000 véhicules par voie. Des mesures sont également mises en place pour les types de systèmes de ventilation autorisés, et plus particulièrement :

- La ventilation longitudinale n'est autorisée dans les tunnels à trafic bidirectionnel et/ou unidirectionnel congestionné que si une analyse des risques montre qu'elle offre un niveau de sécurité acceptable, ou que si des mesures sont prises pour assurer la sécurité, telles que gestion du trafic, distances plus courtes jusqu'aux sorties de secours et autres. Dans le cas contraire, des gaines d'évacuation des fumées doivent être construites pour garantir un niveau de risque acceptable ;

regulations, specific developments are necessary to determine optimal reactions adapted to the fire.” This document attempts to address this question of ventilation control.

► EU-DIRECTIVE 2004/54/EC

The importance of ventilation and ventilation control has been recognized in the recent EU Directive on the minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network [2], which develops requirements in two areas relevant to this report – operation and ventilation.

This Directive defines the role of Tunnel Manager whose main tasks are to secure safety for users and operators both in normal status (prevention) and in the event of an incident; to monitor the efficient performance of all installations (including ventilation, lighting, etc.) during normal operation and adjust them as required in the event of an incident; and to ensure proper maintenance of all structural and electromechanical installations. In the design phase, the Tunnel Manager, or if he has not been appointed, then the designer and owner, have to work closely together with the emergency services to develop emergency response plans, and with the designer, since the tunnel systems must support the required modes of operation during standard and degraded responses. There are also interfaces with utilities, suppliers etc.

With regard to ventilation, the EU Directive addresses the need for systems to control the pollutants emitted by road vehicles under normal and congested operation and control of heat and smoke in the event of a fire. It prescribes the requirement for a mechanical ventilation system for tunnels longer than 1,000 m having a daily traffic volume higher than 2,000 vehicles per lane. Measures are also put in place for the types of allowable ventilation schemes, specifically:

- longitudinal ventilation in tunnels with bi-directional and/or congested unidirectional traffic is only allowed if a risk analysis shows that it provides an acceptable level of safety, or measures are taken, such as traffic management, shorter emergency exit distances and similar are provided to ensure safety. Otherwise, smoke exhaust ducts must be constructed in order to guarantee an acceptable risk level;



- 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*.

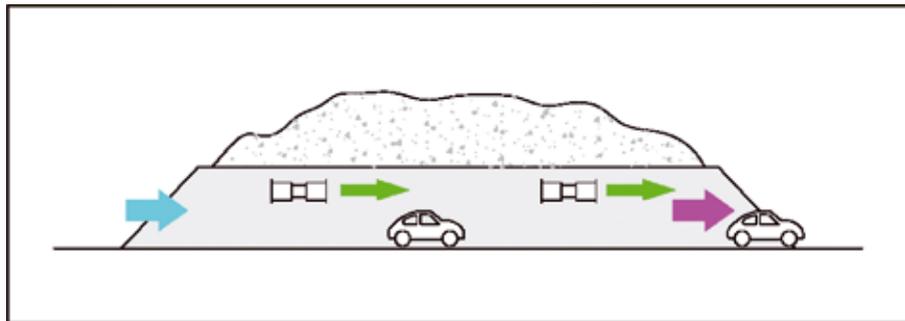


FIGURE 1 - VENTILATION LONGITUDINALE AVEC ACCÉLÉRATEURS

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*.

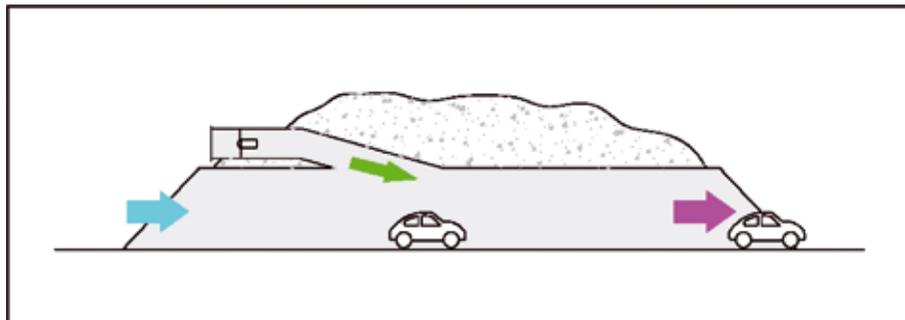


FIGURE 2 - VENTILATION LONGITUDINALE AVEC INJECTEUR SACCARDO

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*.

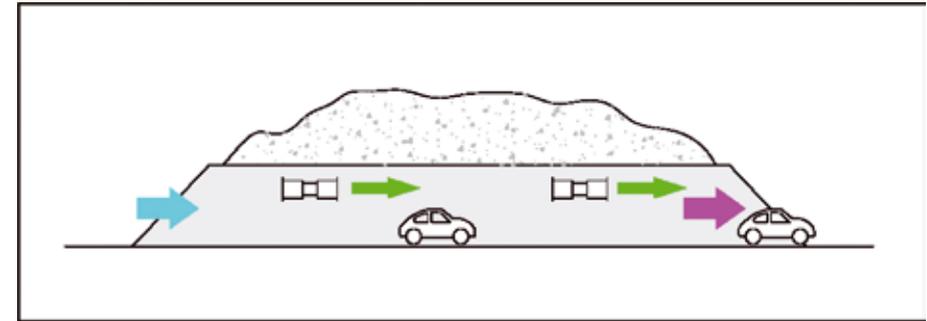


FIGURE 1 - LONGITUDINAL VENTILATION WITH JET FANS

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*.

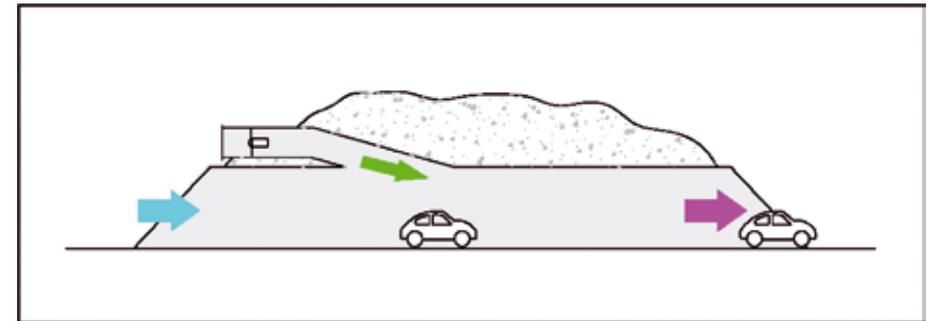


FIGURE 2 - LONGITUDINAL VENTILATION WITH SACCARDO NOZZLE

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.

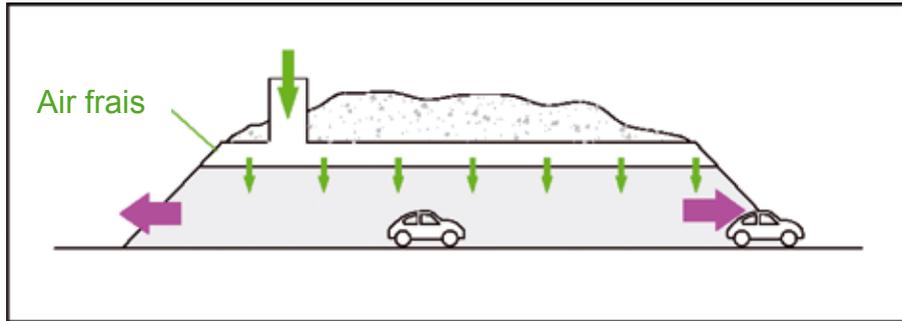


FIGURE 3 - VENTILATION SEMI-TRANSVERSALE EN CONDITION D'EXPLOITATION NORMALE : INJECTION D'AIR FRAIS

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.

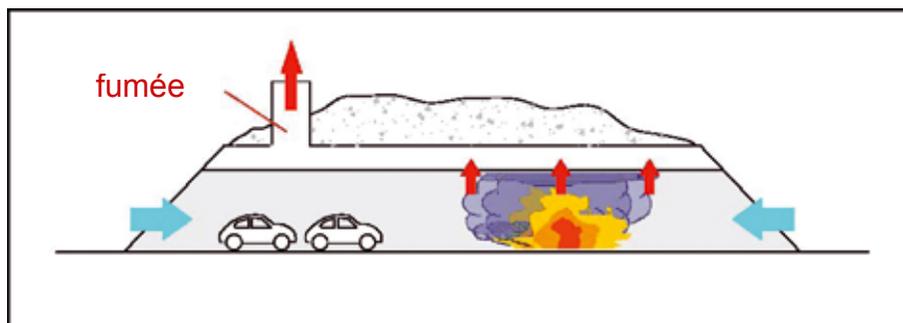


FIGURE 4 - VENTILATION SEMI-TRANSVERSALE AVEC TRAPPES DE DÉSENFUMAGE TÉLÉCOMMANDEES.
[Note : En cas d'incendie, seules les trappes proches de l'incendie sont ouvertes. Toutes les autres sont fermées.]

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.

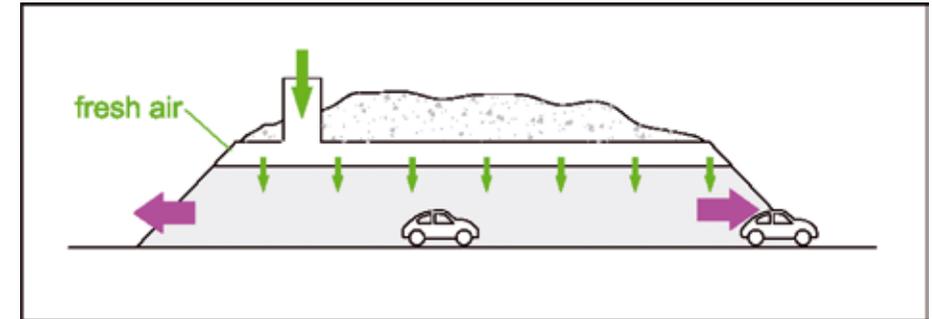


FIGURE 3 - SEMI-TRANSVERSE VENTILATION: DURING NORMAL OPERATING CONDITIONS; FRESH AIR INJECTION

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.

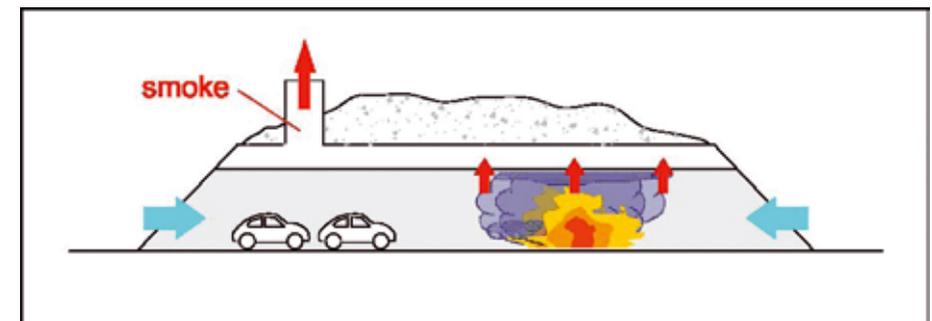


FIGURE 4. SEMI-TRANSVERSE VENTILATION WITH REMOTELY CONTROLLED DAMPERS.
[Note: In case of fire, only the dampers near to the fire are opened. All others are closed.]



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.*

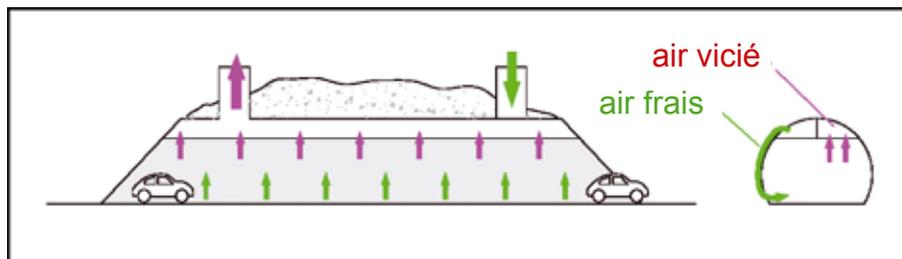


FIGURE 5 - SYSTÈME DE VENTILATION TRANSVERSALE
AVEC AMENÉE ET EXTRACTION D'AIR UNIFORMES

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.*

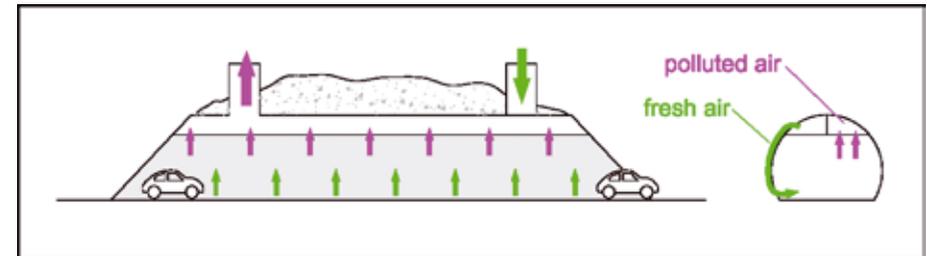


FIGURE 5 - TRANSVERSE VENTILATION SYSTEM
WITH UNIFORM SUPPLY AND EXTRACT OF AIR.

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.

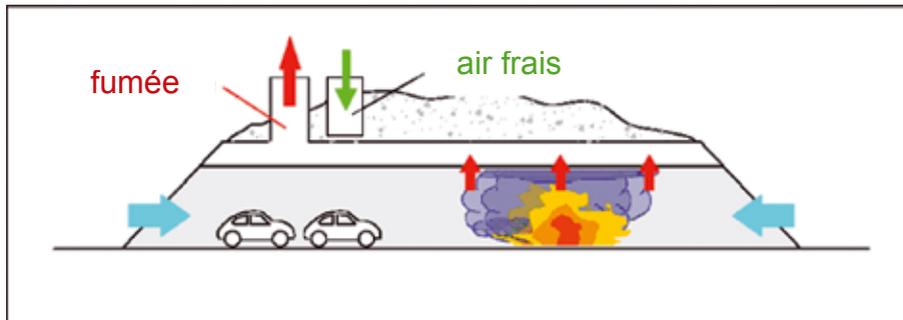


FIGURE 6 - VENTILATION TRANSVERSALE AVEC TRAPPES DE DÉSENFUMAGE TÉLÉCOMMANDÉES.
[Note : En cas d'incendie, seules les trappes proches de l'incendie sont ouvertes. Toutes les autres sont fermées.]

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.

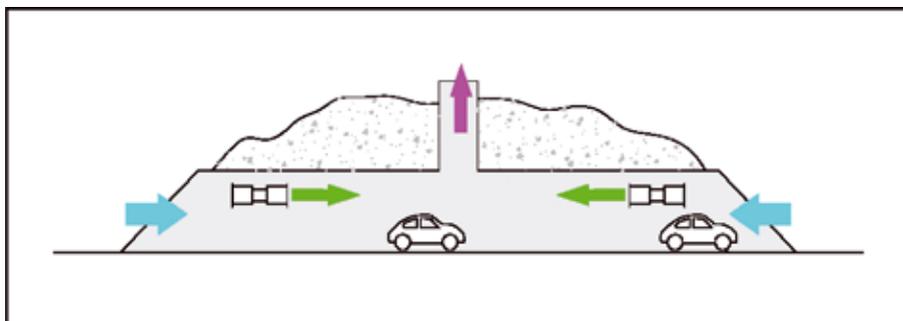


FIGURE 7 - SYSTÈME D'EXTRACTION MASSIVE PONCTUELLE

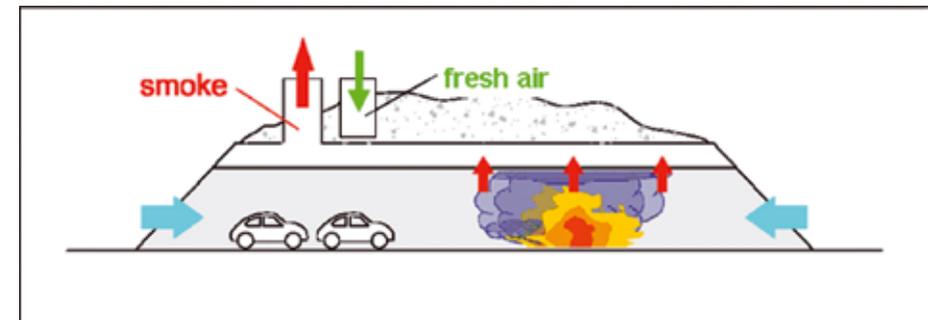


FIGURE 6 - TRANSVERSE VENTILATION WITH REMOTELY CONTROLLED DAMPERS.
[Note: In case of fire, only the dampers near to the fire are opened. All others are closed.]

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.

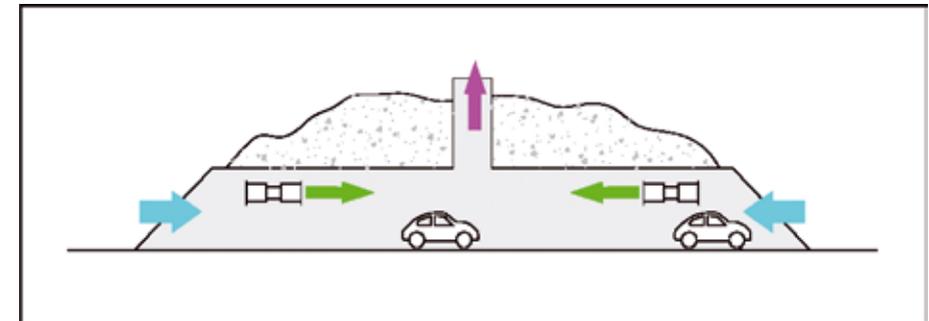


FIGURE 7 - MASSIVE POINT EXTRACTION SYSTEM



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



visibilité due aux particules, ou les gaz toxiques tels que le monoxyde de carbone (CO), et dans certains pays les oxydes d'azote (NOx). L'AIPCR [9] recommande les valeurs de seuil à respecter ; la législation nationale peut être plus ou moins rigoureuse. Ainsi, en exploitation normale, une alarme pollution se produit lorsque la qualité de l'air ou la visibilité est moins bonne que la valeur autorisée, par exemple CO supérieur à 200 ppm ou visibilité inférieure à 0,012 m-1 [9]. Dans ce cas, la limite de l'exploitation normale est réputée atteinte. Des actions telles que la fermeture du tunnel pourraient alors être engagées.

Pour les travaux de maintenance dans le tunnel, la ventilation du tunnel doit garantir les critères de qualité de l'air pendant l'exposition plus longue des personnes qui travaillent.

Certains systèmes de ventilation de tunnel sont principalement conçus et exploités afin de réduire au minimum l'impact sur l'environnement aux têtes des tunnels, voir par exemple le rapport AIPCR *Tunnels routiers : Guide pour l'optimisation de l'impact sur la qualité de l'air dans l'environnement* [10]. D'autres objectifs sont occasionnellement poursuivis, par exemple réduire au minimum le risque de condensation sur les pare-brise des véhicules, ou empêcher l'entraînement de brouillard depuis l'extérieur du tunnel.

La commande en exploitation normale doit être réalisée à des coûts d'exploitation aussi faibles que possible. Traditionnellement, la commande du système de ventilation est réalisée en mesurant les polluants pertinents (opacité, ainsi que CO et/ou NOx), afin d'optimiser l'utilisation du système. Il existe des cas où le système de ventilation est commandé en fonction de mesures de trafic, principalement la vitesse, la densité et les types de véhicules. L'idée est alors de prédire la concentration des polluants par des modèles d'émission basés sur des statistiques, et de calculer le courant d'air nécessaire, d'où découlent alors les réglages de la ventilation. Une version simplifiée, par exemple, pourrait régler la ventilation uniquement en fonction de l'heure de la journée. Pour de plus amples détails, prière de se reporter aux références [11] à [13].

► EXPLOITATION EN SITUATION D'URGENCE

Aspects généraux

Par opposition à l'exploitation normale, où les conditions dans le tunnel évoluent assez lentement, les conditions durant un incendie peuvent changer rapidement, entraînant la détérioration de la situation à l'intérieur du tunnel. Le présent paragraphe caractérise les événements en fonction des étapes de l'évolution d'un incendie et des réactions requises de la part du système de ventilation pour optimiser la sécurité des usagers.

monoxyde (CO), and in some countries oxides of nitrogen (NOx) in each section of the tunnel. PIARC [9] recommends the threshold values to adhere to; National legislation may be more or less stringent. For example, during normal operation a pollution alarm occurs when the air quality or visibility is worse than that permitted e.g. CO higher than 200 ppm or visibility worse than 0.012 m-1 [9]. Then the limit of normal operation would be deemed to have been reached. Actions, such as closing the tunnel, might be adopted.

For maintenance work in the tunnel, the tunnel ventilation has to ensure the air-quality criteria for longer exposure of workers.

Some tunnel ventilation systems are primarily designed and operated in order to minimize the impact on the environment at the tunnel portals, see e.g. PIARC report *Road Tunnels: A Guide to Optimising the Air Quality Impact upon the Environment* [10]. Other objectives are occasionally pursued e.g. to minimise the risk of condensation occurring on the windscreens of vehicles and preventing the entrainment of fog from outside the tunnel.

Control for normal operation should be achieved at minimal operational costs. It is conventional to control the operation of the ventilation system through measurement of the relevant pollutants (opacity; either or both CO and NOx), to optimise the use of the system. There are cases where the ventilation system is controlled according to measurements of traffic, mainly speed, density and type of vehicle. The idea is then to predict pollutant concentration with statistically based emission models, and to calculate the necessary airflow which would subsequently determine the ventilation settings. A simplified version, for example, would set the ventilation depending only on the time of day. [11, 12 & 13] provide further specific details.

► EMERGENCY OPERATION

General aspects

In contrast with normal operation, where conditions in the tunnel change rather slowly, the conditions during a fire may change rapidly, leading to deteriorating conditions within the tunnel. This section characterizes the events in terms of the stages through which a fire develops and the response required from the ventilation system in order to optimise the safety of the users.



Phases

La *figure 8* montre le déroulement des événements survenant au cours d'un incendie. Après la phase « d'allumage » de l'incendie, si celui-ci se développe, il s'ensuit l'auto-évacuation du tunnel, puis l'évacuation assistée après l'arrivée des services d'intervention. Avant que les systèmes de ventilation ne soient activés, l'incendie doit être « détecté » et la détection doit être confirmée. Pour tenir compte des incertitudes dans le sens de la sécurité, les procédures d'exploitation du tunnel peuvent cependant prévoir que la ventilation d'incendie soit activée avant complète confirmation de l'incendie, par mesure de précaution.

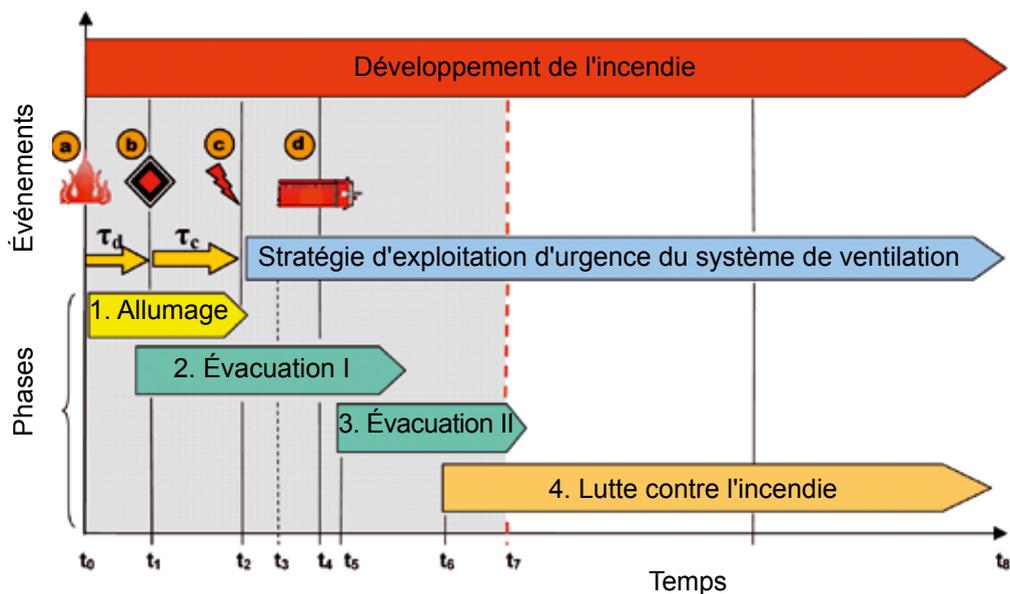


Figure 8 : Phases typiques des incendies (selon AIPCR 1999) et événements correspondants

Légende des temps :

- t_0 : début de l'incendie représenté par l'événement « a » ;
- t_{0+} : début de l'auto-sauvetage. Le décalage par rapport à t_0 dépend de diverses circonstances par ex. le degré de sensibilisation et le temps de réaction des usagers du tunnel, facteurs qui varient d'un individu à l'autre ;
- t_1 : détection de l'incendie représentée par l'événement « b ». Il peut être détecté par divers moyens, par ex. le système de vidéosurveillance (détection automatique à partir d'images vidéo), détection par capteurs de chaleur, détection visuelle par l'opérateur ;

Phases

Figure 8 shows the course of events that occur during a fire. Assuming that the fire develops after its “ignition” phase, then self-evacuation of the tunnel would follow, and then assisted evacuation, after the arrival of the emergency services. Prior to the activation of ventilation systems, the fire must be “detected” and the detection confirmed. Erring towards safety, however, the tunnel operating procedures may dictate that fire ventilation is activated before full confirmation of a fire, as a precautionary measure.

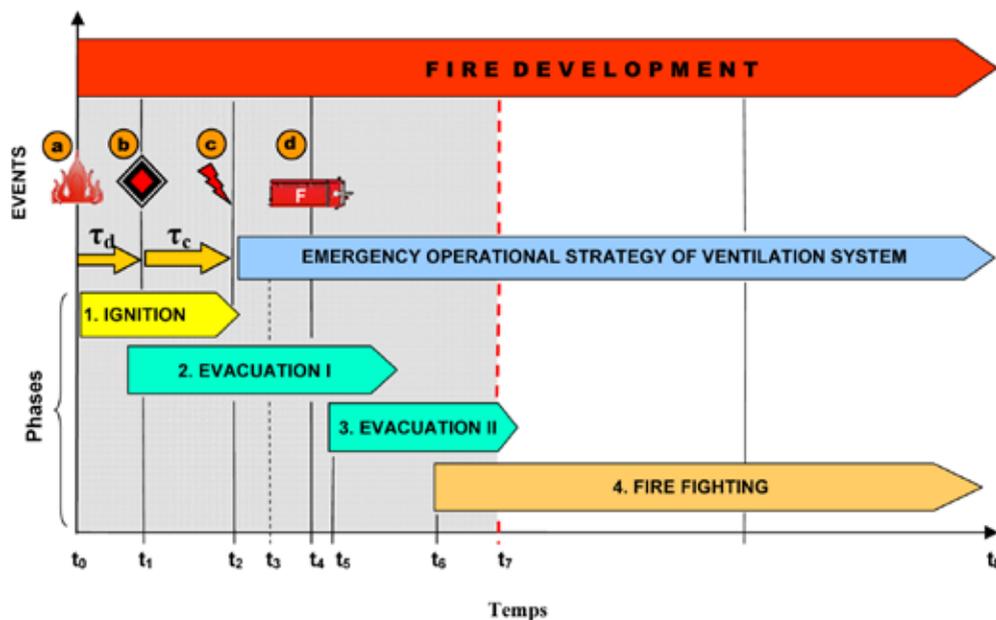


FIGURE 8 - TYPICAL FIRE ACCIDENT PHASES (ACCORDING TO PIARC 1999) VS. EVENTS

The times relate to:

- t_0 : start of fire represented by event “a”;
- t_{0+} : start of self-rescue. The delay from t_0 depends on various circumstances e.g. the awareness and reaction time of the tunnel user, a factor that will vary between individuals;
- t_1 : fire detection represented by event “b”. It can be detected by several means e.g. CCTV (video imaging detection), heat sensor detection, visual detection by the operator.



- t_2 : confirmation de l'incendie représentée par l'événement « c » (peut pratiquement coïncider avec t_1 dans le cas de systèmes de détection d'incendie automatiques). La confirmation de la détection de l'incident entraîne une alarme incendie générale et le déclenchement de l'exploitation d'urgence ;
- t_3 : réalisation intégrale des conditions de ventilation d'urgence (retard dû au temps de mise en route) ;
- t_4 : arrivée sur place des services d'intervention, représentée par l'événement « d » ;
- t_5 : début du sauvetage assisté ;
- t_6 : début de la lutte contre l'incendie par les services d'intervention ;
- t_7 : fin de l'évacuation ;
- t_8 : fin de l'exploitation d'urgence.

La chronologie entre les phases de l'incendie et les événements peut ne pas suivre cet ordre. Par exemple, il se peut que les services de secours arrivent sur place avant qu'il n'y ait ventilation d'urgence intégrale (par ex. $t_3 > t_4$).

Ces temps déterminent les périodes suivantes :

- t_0 à t_{0+} : période précédant le mouvement, c'est-à-dire délai qui s'écoule jusqu'au moment où les usagers du tunnel commencent à évacuer (début du stade Evacuation 1). C'est un choix individuel fait par chaque usager.
- t_0 à t_1 : période de détection de l'incendie (τ_d). L'objectif devrait être de réduire au minimum la durée de la détection.
- t_1 à t_2 : période d'évaluation et de validation (τ_c) de la détection de l'incident, qui se termine par la confirmation. La confirmation aboutit au déclenchement de la stratégie d'exploitation d'urgence du système de ventilation. Un objectif important est de réduire cette période au minimum en utilisant des systèmes de détection d'incendie rapides et extrêmement fiables.
- t_2 à t_3 : période de mise en route du système de ventilation. Au temps t_3 , les conditions de ventilation d'urgence appropriées pour l'évacuation du tunnel sont pleinement fonctionnelles. L'objectif est de réduire cette période au minimum.
- t_5 à t_7 : phase de sauvetage assisté (Evacuation 2) par les services d'intervention.
- t_6 à t_8 : phase de lutte contre l'incendie.

- t_2 : confirmation of the fire represented by event "c" (can practically coincide with t_1 in the case of automatic fire detection systems). Confirmation of incident detection leads to a general fire alarm and to the initialization of emergency operation;
- t_3 : emergency ventilation conditions fully achieved (delay due to start-up time);
- t_4 : arrival of emergency services on site, represented by event "d";
- t_5 : assisted rescue begins
- t_6 : beginning of fire fighting by emergency services
- t_7 : end of evacuation
- t_8 : end of emergency operation

The correlation between the fire incident phases and events may not follow this sequence. For instance the rescue services could arrive on site prior to having full emergency ventilation (e.g. $t_3 > t_4$).

The corresponding time periods are:

- t_0 to t_{0+} : is the pre-movement time i.e. the delay until the tunnel users start egress (beginning of Evacuation 1). It is an individual choice for each user.
- t_0 to t_1 : is the fire detection period (τ_d). An objective should be to minimize the detection time.
- t_1 to t_2 : is the evaluation and validation period (τ_c) of the incident detection, ending with confirmation. The confirmation leads to the initiation of the emergency operational strategy of ventilation system. A primary objective is to minimize this time by using fast and highly reliable fire detection systems.
- t_2 to t_3 : is the start-up period of the ventilation system. At t_3 , the emergency ventilation conditions appropriate for evacuation of the tunnel are fully achieved. An objective being to minimize this time.
- t_5 to t_7 : assisted rescuing (Evacuation 2) phase by emergency services.
- t_6 to t_8 : fire-fighting phase.



Influence de la ventilation sur la répartition et la stratification des fumées

Les fumées chaudes provenant d'un incendie dans un tunnel s'élèvent en raison des forces de flottabilité. Si l'air ne circule pas, ou circule très lentement, les fumées se répandent le long du plafond des deux côtés de l'incendie. Si le tunnel est en pente, les effets de flottabilité peuvent être suffisants pour entraîner l'ensemble du courant d'air dans le tunnel vers le haut en suivant la déclivité du tunnel. Les fumées sont alors également transportées dans cette direction. Au-dessous de ces couches de fumée, de l'air frais est aspiré vers l'intérieur, ce qui crée un courant d'air froid qui se déplace en direction de l'incendie, c'est-à-dire dans la direction opposée à celle des fumées qui se répandent. Cette séparation entre les couches supérieures chaudes et les couches inférieures plus froides s'appelle stratification.

En raison d'un processus complexe d'échange de masse et de chaleur, les fumées se refroidissent progressivement et se mélangent à l'air ; au bout d'un certain temps, aussi bien les sections du tunnel situées en amont (par rapport au sens du courant d'air) que celles situées en aval peuvent être entièrement remplies de fumée. Ainsi, la stratification est un phénomène temporaire, dont l'expérience montre qu'il peut ne pas durer plus de 15 minutes, à moins qu'il ne soit préservé par une ventilation appropriée comprenant une extraction au niveau du plafond et un contrôle du courant d'air longitudinal. Cette période est essentielle pour que les usagers du tunnel se sauvent par eux-mêmes. De ce fait, si la stratification fait partie de la stratégie d'exploitation d'urgence, un contrôle fiable et robuste de la vitesse du courant d'air longitudinal est essentiel. S'il existe une vitesse longitudinale faible, et que la turbulence n'est pas un facteur, la stratification peut être maintenue pendant des périodes plus longues, particulièrement s'il y a une extraction des fumées au niveau du plafond.

Retour de fumée (backlayering)

Lorsque la partie du tunnel où se déroule l'incident est ventilée, un courant d'air longitudinal pousse les fumées le long du tunnel en aval du feu, alors qu'en amont, la progression de la couche de fumée est ralentie. Le phénomène par lequel la couche de fumée circule dans le sens opposé à la direction du courant d'air s'appelle retour de fumée (backlayering). Un nouvel accroissement de la vitesse longitudinale du courant d'air stoppe totalement le retour de fumée, à une certaine valeur appelée vitesse critique. Pour des vitesses égales ou supérieures à la vitesse critique, la stratification est improbable.

Pour une discussion plus approfondie de ce sujet, voir AIPCR 1999 [1], page 103.

Influence of Ventilation on Smoke Distribution and Stratification

Hot smoke from a fire in a tunnel rises due to buoyancy forces. If the air is not moving, or moving very slowly, the smoke will spread along the ceiling on both sides of the fire. If the tunnel slopes, then buoyancy effects may be sufficient to cause the bulk flow in the tunnel to move upwards according to the tunnel gradient. Smoke will be carried along in this direction also. Underneath these smoke layers, fresh air is drawn in, so creating a cold flow that moves towards the fire, i.e. in an opposite direction to the spreading smoke. This separation between the hot upper layers and cooler lower layers is termed stratification.

Due to a complex process of mass and heat exchange, the smoke is gradually cooled and mixes with the air, and after a period of time both upstream and downstream sections of the tunnel can be completely filled with smoke. Thus stratification is a temporary phenomenon, and experience shows that it may not last for more than about 15 minutes, unless it is maintained by appropriate ventilation including extraction from the ceiling and control of longitudinal airflow. This time period is essential for tunnel users to rescue themselves. Hence, if stratification is part of the emergency operation strategy, then reliable and robust control of the longitudinal air flow velocity is essential. If there is a low longitudinal velocity, and turbulence is not a factor, then stratification can be maintained for longer periods, particularly if there is extraction of smoke at the ceiling.

Backlayering

Where the incident section of the tunnel is ventilated, a longitudinal airflow pushes the smoke through the tunnel downstream of the fire, while at the upstream side the progression of the smoke layer is slowed down. The phenomenon of the smoke layer flowing against the airflow direction is referred to as backlayering. Further increase of the longitudinal airflow velocity will at a certain value, called the critical velocity, completely stop the backlayering. For velocities equal to or higher than the critical velocity, stratification is unlikely.

For further discussion of this topic, see 1999 PIARC report [1], page 103.



Influence du trafic sur la stratégie de ventilation

La stratégie optimale pour la désenfumage peut dépendre de la situation du trafic avant l'incident, voir AIPCR 1999 [1], section V.7. La situation du trafic avant l'incendie sert à distinguer entre trois cas :

- Trafic unidirectionnel sans congestion :
 - On suppose que les véhicules situés en aval de l'incident pourront sortir du tunnel sans entrave
- Trafic unidirectionnel avec congestion :
 - Des véhicules peuvent également être bloqués en aval de l'incident
- Trafic bidirectionnel :
 - Il est probable que des véhicules seront bloqués des deux côtés de l'incident

Stratégies de gestion des fumées pour la phase d'auto-sauvetage

Les stratégies de ventilation décrites ci-dessous se rapportent à la phase d'auto-sauvetage. Il s'agit de la phase critique au cours de l'incendie. Dans certains cas, lors de la phase de lutte contre l'incendie, il est judicieux d'adapter la stratégie, par exemple en empêchant le retour de fumée vers le côté utilisé par les services d'intervention pour s'approcher du feu. De tels ajustements sont alors déclenchés manuellement.

Au moyen du système de ventilation, les gaz sont soit poussés longitudinalement hors du tunnel, soit extraits du tunnel. Cela entraîne deux scénarios distincts :

- Désenfumage longitudinal
- Extraction des fumées

Désenfumage longitudinal

La vitesse longitudinale (voir *Vitesse du courant d'air dans le tunnel (anémomètre)*, page 66 pour ce qui concerne sa mesure) a les effets suivants :

- Vitesse proche de zéro (la vitesse longitudinale dans le tunnel est inférieure à environ 0,5 m/s). Les fumées se stratifient et se répandront dans les deux directions ; les concentrations de gaz toxiques augmenteront, entraînant des conditions intenable, puisque ces gaz ne seront pas dilués. Cette stratégie peut être moins favorable que si l'on assure une vitesse faible, car à vitesse nulle, la concentration des gaz toxiques ainsi que la température peuvent être très élevées à proximité de l'incendie.
- Vitesse faible (vitesse longitudinale dans le tunnel de $1,2 \pm 0,2$ m/s). La faible turbulence et les importantes forces de flottabilité facilitent la stratification des

Influence of Traffic on Ventilation Strategy

The optimal strategy for smoke management can depend on the traffic situation prior to the incident, see 1999 PIARC report [1], section V.7. The traffic situation prior to a fire is used to define three distinct cases:

- Unidirectional traffic without traffic congestion:
 - It is assumed that the vehicles downstream of an incident will be able to exit the tunnel unhindered
- Unidirectional traffic with traffic congestion:
 - Vehicles may also be blocked at the downstream side of the incident
- Bidirectional traffic:
 - Vehicles are likely to be blocked on both sides of the incident

Smoke-management strategies for the self-rescue phase

The ventilation strategies described below refer to the self-rescue phase. This is the critical phase during the fire. In some cases, during the fire-fighting phase, an adaptation of the strategy is advantageous e.g. by preventing backlayering of smoke on the side used by the emergency services to approach the fire. Such adjustments are initiated manually.

Using the ventilation system the flow is either blown longitudinally out of the tunnel or extracted from the tunnel. This results in two distinct scenarios:

- Longitudinal smoke management
- Smoke extraction

Longitudinal Smoke Management

The longitudinal velocity (see *Section "Tunnel Air Flow Velocity (Anemometer)" regarding its measurement, page 67*) has the following effects:

- near-zero velocity (the longitudinal velocity in the tunnel is less than about 0.5 m/s). Smoke will stratify and spread in both directions; concentrations of toxic gases will increase, leading to untenable conditions, as the gases are not diluted. This strategy may be less favourable than providing a low velocity, as at zero velocity the concentration of toxic gases as well as the temperature might be very high in the region of the fire;
- low velocity (a longitudinal velocity in the tunnel of 1.2 ± 0.2 m/s). The low turbulence and strong buoyant forces promote smoke stratification, enabling



fumées, permettant aux personnes de s'échapper en dessous de la couche de fumée. De plus, les concentrations de gaz toxiques seront vraisemblablement réduites. Dans ce cas, la fumée se répandra probablement des deux côtés de l'incendie. La valeur cible est inférieure à la vitesse de marche des personnes en situation de bonne visibilité, voir AIPCR 1999 [1], chapitre I.4.6.

- Vitesse critique (de l'ordre de 2,5 à 3 m/s, [1]). Dans ce cas, aucun retour de fumée n'est présent et les fumées sont entièrement poussées vers un côté de l'incendie. En revanche, la stratification des fumées est très improbable.
- Au-dessus de la vitesse critique. Les fumées sont maintenues du côté aval de l'incendie. Des débits élevés peuvent avoir l'avantage de réduire la température et de diminuer la toxicité, mais ils peuvent d'un autre côté entraîner des puissances calorifiques plus élevées et ils anéantiront totalement la stratification.

L'exploitation du système de ventilation doit également tenir compte de la situation du trafic comme présenté dans le *tableau 1*. Celui-ci résume aussi les principes proposés pour la ventilation longitudinale.

TABLEAU 1 - STRATÉGIES DE DÉSENFUMAGE AVEC LES SYSTÈMES DE VENTILATION LONGITUDINAUX		
Cas	Trafic avant l'incident	Principe pour la ventilation longitudinale
A	Trafic unidirectionnel sans congestion	Courant d'air dans la direction du trafic afin de prévenir ou au moins de réduire au minimum le retour de fumée
B	Trafic unidirectionnel avec congestion	Vitesses du courant d'air relativement faibles (par ex. 1,2±0,2 m/s) dans la direction du trafic afin de réduire au minimum le mouvement des fumées vers l'amont, permettre la stratification des fumées, favoriser la dilution des gaz toxiques et permettre aux personnes de s'échapper.
C	Trafic bidirectionnel	Vitesses de courant d'air relativement faibles afin d'éviter les inversions de courant d'air sauf si les circonstances imposent d'autres choix (par exemple incendies à proximité des têtes), permettre la stratification de la fumée et permettre aux personnes de s'échapper dans les deux directions.

Nota bene : il convient également de se reporter aux textes nationaux, à la directive de l'UE ou autres pour de plus amples conseils sur les aspects de conception liés à la longueur du tunnel, aux objectifs et à la conception de la ventilation, etc.

Lors du choix de la vitesse longitudinale, il convient également de tenir compte de la vitesse d'évacuation des occupants des véhicules, voir AIPCR 1999 [1], chapitre I.4.6.

people to escape underneath the smoke layer. Moreover, the concentrations of the toxic gases are likely to be reduced. In this case, the smoke is likely to spread on both sides of the fire. The target value is below the walking speed of the people in good visibility conditions, see 1999 PIARC report [1], section I.4.6.

- critical velocity (typically about 2.5 to 3 m/s [1]). In this case no backlayering is present and the smoke is blown entirely to one side of the fire. However, smoke stratification is very unlikely;
- above the critical velocity. The smoke is kept on the downstream side of the fire. High flow rates may have the advantage of reducing temperature and decreasing toxicity; on the other hand, they may lead to higher heat release rates and will completely destroy stratification.

The operation of the ventilation system must also consider the traffic situation as outlined in *table 1* which also summarizes the proposed principles for longitudinal ventilation are as follows:

TABLE 1 - STRATEGIES FOR SMOKE CONTROL WITH LONGITUDINAL VENTILATION SYSTEMS		
CASE	TRAFFIC PRIOR TO INCIDENT	PRINCIPLE FOR LONGITUDINAL VENTILATION
A	Unidirectional traffic without traffic congestion	Flow velocities in the direction of traffic to prevent or at least minimize backlayering of smoke
B	Unidirectional traffic with traffic congestion	Relatively low flow velocities (e.g. 1.2 ± 0.2 m/s) in the direction of traffic in order to minimize flow spread upstream, allow smoke stratification, support dilution of toxic gases and enable people to escape.
C	Bidirectional traffic	Relatively low flow velocities should be maintained, to avoid flow reversal unless circumstances dictate otherwise (for example fires near portals), allow smoke stratification and enable people to escape in both directions.

Note: reference should also be made to National Guidelines, the EU Directive or similar for further advice on the design aspects relating to tunnel length, ventilation objectives and design etc.

When selecting the longitudinal velocity, the speed of egress of the vehicle occupants should also be considered, see 1999 PIARC report [1], section I.4.6.



Dans le cas A, diverses philosophies sont adoptées. Dans certains cas, une vitesse longitudinale du courant d'air entre 1 et 2 m/s est considérée comme optimale. Dans d'autres, on applique la philosophie simple consistant à engager tous les équipements disponibles, par exemple tous les accélérateurs, pour pousser la fumée hors de la tête de sortie. Des stratégies intermédiaires garantissent une vitesse longitudinale qui correspond à la vitesse critique à l'emplacement de l'incendie. S'il existe une incertitude quant à savoir si le trafic est congestionné ou non, il est conseillé d'opter pour le cas B.

Dans les cas B et C, un objectif habituel est de maintenir activement une vitesse de l'ordre de 1,0 à 1,5 m/s. D'importantes variations du courant d'air, et en particulier des inversions de son sens, doivent être évitées. En particulier pour le cas C, l'action initiale peut consister à désactiver la ventilation mécanique. Si un contrôle fiable du courant d'air longitudinal est impossible, il pourrait être préférable de n'utiliser aucune ventilation mécanique. Les aspects négatifs et les risques présentés par des vitesses de courant d'air très faibles doivent être pris en considération.

Pour les cas B et C, il serait préférable de ne pas faire fonctionner les accélérateurs et injections ponctuelles situés près de l'incendie, en particulier du côté amont, car ils provoqueraient vraisemblablement la déstratification.

Dans les cas B et C, le désenfumage longitudinal est insuffisant pour garantir un niveau de sécurité acceptable sans l'ajout d'autres dispositions de sécurité, par exemple une gaine d'extraction des fumées, lorsque le trafic dépasse un seuil qui doit être estimé par une analyse des risques (par exemple environ 3 000 véhicules par jour pour le cas C).

Extraction des fumées

L'extraction des fumées peut être réalisée par les systèmes suivants :

- Extraction des fumées localisée au moyen d'un système de ventilation transversal ou semi-transversal comprenant des trappes de désenfumage télécommandées.
- Ventilation semi-transversale fonctionnant en extraction
- Ventilation transversale
- Extraction massive ponctuelle

En cas de désenfumage, la fumée devrait être extraite aussi près de l'incendie que possible, le critère étant de maintenir la fumée à l'intérieur de la zone d'extraction. La zone d'extraction devrait être aussi réduite que qu'il est possible selon la disposition des trappes de désenfumage, leur taille, etc. Voir par

In case A, various philosophies are adopted. In some cases, a longitudinal flow velocity of between 1 and 2 m/s is thought optimal. In other situations, the simple philosophy of engaging all available equipment e.g. all jet fans to blow the smoke out of the exit portal is used. Intermediate strategies ensure a longitudinal velocity that corresponds to the critical velocity at the location of the fire. If there is uncertainty as to whether or not the traffic is congested, then it is advisable to opt for case B.

In cases B and C, a typical objective is to actively maintain a velocity of about 1.0 to 1.5 m/s. Large flow fluctuations and in particular flow reversals are to be avoided. In particular for case C, the initial action may be to deactivate the mechanical ventilation. If reliable control of the longitudinal flow is impossible, it might be better not to engage any mechanical ventilation. The negative aspects and risks of very low flow velocities have to be considered.

For cases B and C, jet fans and point injections should preferably not be operated when they are situated near to the fire, particularly on the upstream side, because they are likely to cause de-stratification.

For cases B and C, longitudinal smoke management is insufficient to guarantee an acceptable safety level, without the addition of other measures, e.g. a smoke exhaust duct, when traffic exceeds a threshold, that has to be estimated through risk analysis (e.g. about 3000 vehicles per day for case C).

Smoke Extraction

Smoke extraction can be applied with the following systems:

- localised smoke extraction using a transverse or a semi-transverse ventilation system including remotely controlled dampers,
- semi-transverse ventilation by flow extraction,
- transverse ventilation,
- massive point extraction.

In the case of smoke extraction, the smoke should be extracted as near to the fire as possible, the criterion being to maintain the smoke within the extraction zone. The extraction zone should be as short as practicable, depending on the disposition of dampers, their size etc. See for example PIARC report *Systems and*



exemple le rapport *Systèmes et équipements pour la maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers* [14]. Il est recommandé que la fumée soit extraite à pleine capacité à l'emplacement de l'incendie, en évitant l'extension des fumées grâce à la mise en œuvre d'une gestion du désenfumage dès le commencement de l'incendie.

Les principes applicables sont décrits dans le *tableau 2* :

TABLEAU 2 - STRATÉGIES DE DÉSENFUMAGE AVEC DES SYSTÈMES DE VENTILATION TRANSVERSAUX		
Cas	Trafic avant l'incident	Principe d'extraction de la fumée
A	Trafic unidirectionnel sans congestion	Courant d'air dans la direction du trafic en amont de la zone d'extraction pour empêcher ou au moins réduire au minimum le retour de fumée. Du côté aval, vitesses de courant d'air plus faibles en direction de la zone d'extraction.
B	Trafic unidirectionnel avec congestion	Vitesse longitudinale nulle au centre de la zone d'extraction grâce à des débits d'air venant des deux côtés en direction de la zone d'extraction. Dans ce cas, l'objectif du courant d'air est de préserver la stratification et, si possible, de confiner les fumées aux alentours de la zone d'extraction
C	Trafic bidirectionnel	Vitesse longitudinale nulle au centre de la zone d'extraction grâce à des débits d'air venant des deux côtés en direction de la zone d'extraction. Dans ce cas, l'objectif du courant d'air est de préserver la stratification et, si possible, de confiner les fumées aux alentours de la zone d'extraction

Pour le cas B, puisque le trafic congestionné a tendance à se déplacer vers l'extérieur du tunnel, la vitesse longitudinale à la zone d'extraction peut être fixée à une valeur supérieure à zéro si on dispose d'informations le permettant.

Sans trappes de désenfumage télécommandées, les fumées sont extraites par des ouvertures relativement petites réparties sur une grande longueur. C'est pourquoi le débit d'extraction à proximité de l'incendie est limité et bien moins élevé que si l'on utilise des trappes de désenfumage télécommandées, voir *paragraphe Influence de la ventilation sur la répartition et la stratification des fumées, page 40*. La stratification de la fumée, en revanche, ne peut pas être garantie mais a plus de chances de survenir si la vitesse du courant d'air longitudinal est inférieure à environ 1,5 m/s.

Que des trappes de désenfumage puissent ou non être télécommandées dans la région de l'incendie, le courant d'air longitudinal doit être contrôlé afin de garantir les vitesses d'air souhaitées en amont et en aval de la zone d'extraction. A cette fin, des contrôles de vraisemblance des mesures de vitesse d'air doivent être

Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels [14]. It is recommended that the smoke be extracted at full capacity at the incident location, avoiding the spread of smoke by implementing smoke control management from the beginning of the fire.

The principles shown in *table 2* apply:

TABLE 2: STRATEGIES FOR SMOKE CONTROL WITH TRANSVERSE VENTILATION SYSTEMS		
CASE	TRAFFIC PRIOR TO INCIDENT	PRINCIPLE FOR SMOKE EXTRACTION
A	Unidirectional traffic without traffic congestion	Flow velocities in direction of traffic upstream of the extraction zone to prevent or at least minimize backlayering of the smoke. On the downstream side, lower flow velocities towards the extraction zone.
B	Unidirectional traffic with traffic congestion	Zero longitudinal velocity at the centre of the extraction zone by having airflow rates from both sides towards the extraction zone. In this case the objective of the airflow is to preserve stratification and, possibly, to confine the smoke to the region of the extraction zone
C	Bi-directional traffic	Zero longitudinal velocity at the centre of the extraction zone by having airflow rates from both sides towards the extraction zone. In this case the objective of the airflow is to preserve stratification and, possibly, to confine the smoke to the region of the extraction zone

For Case B, since the congested traffic would tend to move out of the tunnel, the longitudinal velocity at the extraction zone may be set higher than zero if the information is available to do so.

Without remotely controlled dampers, the smoke is extracted through relatively small openings distributed along a long section. Therefore, the extraction rate near the fire is limited and much lower than using remotely-controlled dampers (see *sub-section Influence of ventilation on smoke distribution and stratification, page 41*). Smoke stratification, however, cannot be guaranteed but is more likely to occur when the longitudinal flow velocity is below about 1.5 m/s.

Whether or not dampers can be controlled in the region of the fire, the longitudinal flow has to be controlled in order to ensure the desired flow velocities up- and downstream of the extraction zone. For this purpose, plausibility checks of the flow measurements have to be carried out in order to ensure that the flow



réalisés afin de garantir que ces mesures soient fiables et représentatives du courant d'air effectif dans le tunnel. De plus, une interférence des équipements servant au contrôle du courant d'air avec le désenfumage doit être évitée par ex. en n'utilisant pas les accélérateurs situés à proximité de la zone de désenfumage.

En cas de ventilation transversale, l'injection d'air transversale devrait être réduite afin d'éviter la déstratification ou de ne pas influencer indûment le courant d'air longitudinal. D'un autre côté, l'injection d'air frais peut être utile pour d'autres considérations, par exemple l'amenée d'air frais vers les itinéraires d'évacuation ou vers les personnes piégées à l'intérieur du tunnel. Voir AIPCR 1999 [1] pour la discussion de ce sujet.

Ventilation semi-transversale et injection ponctuelle

Il est conseillé de ne pas recourir à l'injection ponctuelle à proximité de l'emplacement de l'incendie. En revanche, l'injection ponctuelle plus loin peut être utile pour contrôler le courant d'air longitudinal si la vitesse de l'air et les différences de pression ne sont pas trop élevées. Dans le cas contraire, le contrôle peut être obtenu en ajoutant des accélérateurs. De même, dans le cas d'un système de ventilation semi-transversale avec injection d'air, la ventilation devrait être arrêtée en cas d'incendie et d'autres éléments du système de ventilation (par ex. des accélérateurs) devraient être utilisés pour maîtriser les fumées.

Ventilation des itinéraires d'évacuation

Les itinéraires d'évacuation confinés, comme les galeries de secours dédiées ou les communications transversales, doivent rester libres de fumée grâce à une pression légèrement supérieure à celle du tube où a lieu l'incendie et à une vitesse de courant d'air de l'ordre, au moins, de 1 m/s dans les ouvertures les reliant à celui-ci. Avec une surpression de 50 Pa, les portes battantes d'une surface jusqu'à environ 2,5 m² peuvent être ouvertes manuellement. Pour la conception de la ventilation des itinéraires d'évacuation, les diverses différences de pression dues à l'exploitation de la ventilation du tunnel et aux portes d'évacuation ouvertes doivent être prises en considération. Certains pays préfèrent des portes d'évacuation coulissantes si des différences de pression importantes s'exerçant sur les portes sont inévitables.

Autres aspects importants pour décider de la stratégie de ventilation

Une re-circulation de la fumée entre les têtes doit être évitée. Des mesures passives telles que le déplacement de la tête ou des murs de séparation aident à éviter le passage du courant d'air d'une tête à l'autre, notamment dans la première phase d'un incident. Dans les phases ultérieures, après ajustement des courants d'air, une vitesse d'air de même direction dans le tube sans incident et dans le tube où se s'est produit l'incendie empêche la re-circulation des fumées. A cette fin, le trafic doit être stoppé à l'entrée du le tube sans incident, qui est généralement utilisé comme itinéraire de fuite.

measurements are reliable and representative for the actual flow situation in the tunnel. Moreover, interference of the airflow control devices with the smoke extraction should be avoided e.g. by not using jet fans that are situated close to the smoke-extraction zone.

In the case of transverse ventilation, the transverse flow injection should be reduced to avoid destratification or to unduly influence the longitudinal airflow. On the other hand, fresh air injection may be useful for other considerations, e.g. fresh air supply to the egress routes or for those trapped in the tunnel. See 1999 PIARC report, Chapter V [1] for a discussion of this topic.

Semi-transverse and Point Injection

Point injection should not be used near to the location of the fire. However, point injection further away can be useful to control the longitudinal flow if air velocity and difference of pressure are not too high. Otherwise control can be achieved with additional jet-fans. Similarly, in the case of a semi-transverse ventilation system with air injection, the ventilation should be switched off in the case of fire and other elements of the ventilation system (e.g. jet fans) should be used to control the smoke.

Ventilation of Escape Routes

Enclosed escape routes, such as a dedicated escape tunnel or cross-passage, have to be kept free from smoke by ensuring a somewhat higher pressure than in the incident tube and a flow velocity of at least, say, 1 m/s in openings connecting to the tube with the fire. With an overpressure of 50 Pa swing doors having an area of up to about 2.5 m² can be opened manually. For the design of the ventilation of the escape routes, the various pressure differences due to tunnel ventilation operation and opened escape doors must be taken into account. Certain countries prefer sliding escape doors if high pressure differences over the doors are inevitable.

Other Important Aspects when Deciding on Ventilation Strategy

A short-circuiting of smoke at the portals should be avoided. Passive measures such as portal displacement or separation walls assist in avoiding flow transfer between portals notably in the first phase of an incident. In later phases, after adjusting the air flows, an air velocity in the same direction in the non-incident tube as in the incident tube prevents smoke recirculation. To this end the traffic in the non-incident tube, which is usually used as the egress route, has to be stopped at the entrance.



Si le tunnel est équipé de systèmes fixes de lutte contre l'incendie (SFLI), la stratégie de ventilation peut devoir être modifiée afin de tenir compte de l'effet de tels systèmes ; voir le rapport AIPCR *Tunnels routiers : Evaluation des systèmes fixes de lutte contre l'incendie* [14].

Ventilation au cours des phases de sauvetage assisté et de lutte contre l'incendie

Les exigences des services d'intervention doivent être prises en considération lors de la conception des procédures d'exploitation de la ventilation pour les phases de sauvetage assisté et de lutte contre l'incendie. De manière générale, lorsque les services d'intervention arrivent sur place, ce sont eux qui reprennent les commandes. Dans de nombreuses situations, les mêmes stratégies de ventilation que pendant la phase d'auto-sauvetage s'appliquent aux phases ultérieures. Toutefois, la commande de la vitesse de courant d'air longitudinal pourrait être modifiée pour les besoins des services d'intervention.

Dans certains cas, des programmes de ventilation dédiés pour la lutte contre l'incendie sont mis à disposition. Ils peuvent impliquer une ventilation longitudinale à d'autres vitesses que celles requises pour la phase d'évacuation.

RÉACTION DES SYSTÈMES DE COMMANDE DE LA VENTILATION EN CAS D'INCENDIE

► INTRODUCTION

Ce chapitre décrit les principes de la commande de la ventilation en cas d'incendie. Pour la gestion des incidents de trafic en général, voir : rapport AIPCR *Systèmes de gestion d'incidents de la circulation dans les tunnels routiers* [16].

Le système de commande doit permettre une réaction du système de ventilation à un incident signalé. Cette réaction repose sur des informations émanant de diverses sources à l'intérieur du tunnel. Ces informations sont analysées et validées et la réaction de la ventilation est activée de manière automatique, semi-automatique ou manuelle :

- Dans une commande automatique, il n'y a pas d'intervention de l'opérateur du tunnel. Celui-ci peut cependant intervenir dans le processus automatique.
- Dans un système semi-automatique, l'opérateur du tunnel choisit et lance la procédure de désenfumage. Le système de commande semi-automatique, une fois lancé, commande les composantes du système de désenfumage

If the tunnel is equipped with fixed fire fighting systems (FFFS) the ventilation strategy may have to be modified to take the effect of such systems into account; see the PIARC report *Road Tunnels: An Assessment of Fixed Fire Fighting Systems* [15].

Ventilation during the assisted rescuing and fire-fighting phases

The requirements of the emergency services should be taken into account when designing the ventilation response procedures for the assisted rescue and fire fighting phases. Generally, when the emergency services appear on site, they take over the command. In many situations, the same ventilation strategies as during the self-rescuing phase apply for the succeeding phases. However, the longitudinal flow velocity control might be changed for the needs of the emergency services.

In some cases dedicated fire-fighting ventilation programs are made available. They may involve longitudinal ventilation at other velocities than are required for the evacuation phase.

RESPONSE OF VENTILATION CONTROL SYSTEMS TO FIRE

► INTRODUCTION

This section describes the ventilation control principles in the event of a fire. For traffic incident management in general see: PIARC report *Traffic Incident Management System used in Road Tunnels* [16].

The control system should allow for a response of the ventilation system to a reported incident. This response is based on information retrieved from various sources inside the tunnel. The information is analysed and validated and the ventilation response is activated automatically, semi-automatically or manually:

- in automatic control, there is no intervention of the tunnel operator. The tunnel operator can, however, intervene in the automatic process;
- in a semi-automatic system, the tunnel operator chooses the procedure of the smoke control system and starts it. The semi-automatic control system, when started, controls the components of the smoke control system according to a



selon une procédure programmée à l'avance associée aux objectifs définis par l'opérateur du tunnel.

- Dans les systèmes manuels, l'opérateur analyse les données disponibles et active chaque composant ou groupe de composants du système de désenfumage selon une procédure qui doit être définie à l'avance pour les cas d'incendie.

Il convient de prendre en compte la complexité du système de ventilation et l'organisation du personnel d'exploitation. L'expérience montre qu'un système de ventilation complexe est géré de façon bien plus efficace par un système (semi-) automatique que par un opérateur soumis à des conditions de fort stress.

Les composants du système de désenfumage agissent sur le courant d'air à l'intérieur du tunnel, en le modifiant de manière propre à réduire le risque de lésions corporelles ou de dégâts matériels, mais cela changera également les variables qui sont mesurées. C'est pourquoi la commande doit prendre en compte le fait que les conditions peuvent évoluer avec le temps. Ces changements peuvent être pris en compte dans un système de commande automatique, mais seraient très exigeants en cas de commande manuelle.

Cette approche est esquissée à la *figure 9*.

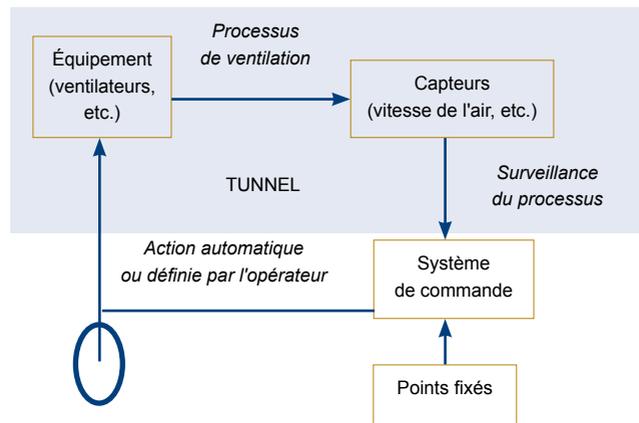


FIGURE 9 - VUE D'ENSEMBLE DE LA BOUCLE DE COMMANDE DE LA VENTILATION

► IMPLICATIONS DE L'EXPLOITATION NORMALE

Une description détaillée de l'exploitation normale va au-delà de la portée du présent rapport. Toutefois, le temps requis pour passer de la ventilation normale

previously programmed procedure associated to the input objectives defined by the tunnel operator;

- in manual systems the operator analyses the available data and activates each component or groups of components of the smoke control system following a procedure that should be pre-defined for the fire.

Consideration needs to be given to the complexity of ventilation system and the organization of operating personnel. Experience shows that a complex ventilation system is much more efficiently managed by a (semi-)automatic system than by an operator performing under high stress conditions.

The components of the smoke-control system act on the flow inside the tunnel, changing it in an appropriate way in order to reduce the risk of injuries or property loss, but it will also change the variables that are measured. Therefore, the control method must take into account that the conditions may change with time. This change would be catered for in an automatic control system, but would be very demanding in the case of manual control.

This approach is outlined in *figure 9, next page*.

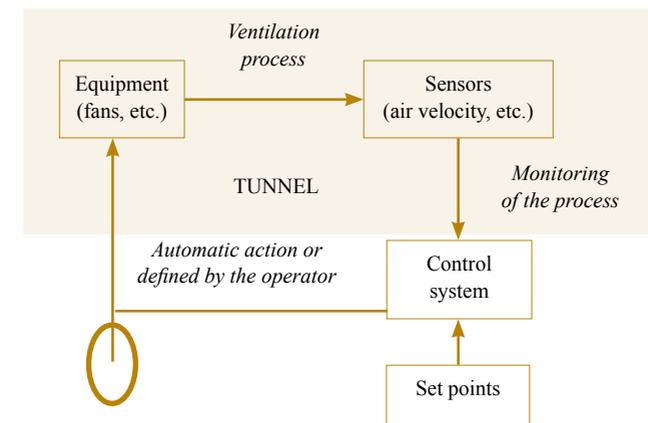


FIGURE 9 - OVERVIEW OF VENTILATION CONTROL LOOP

► IMPLICATIONS OF NORMAL OPERATION

A detailed description of normal operation is beyond the scope of this report. However, the time of transition from normal ventilation to a smoke ventilation



à la stratégie de désenfumage appliquée en cas d'incendie peut être de plusieurs minutes. C'est pourquoi la sécurité d'ensemble est accrue si l'on prend en compte tous les régimes intermédiaires au moment d'établir les procédures de ventilation pour l'exploitation normale.

► VUE D'ENSEMBLE DU PROCESSUS DE COMMANDE

Durant l'exploitation normale, l'objectif principal de la commande de la ventilation consiste à maintenir la qualité de l'air dans des valeurs préétablies tout en tenant compte des coûts d'exploitation. En revanche, un incendie est un événement rare qui est généralement précédé par des incidents tels que panne ou accident. Malheureusement, la transformation de ces incidents en incendies est plus rapide que les processus liés à l'exploitation normale. C'est pourquoi la réaction de l'opérateur et/ou du système automatique doit être rapide.

Par conséquent, le temps de réponse de toute la chaîne des opérations, à savoir détection, identification, validation de l'alarme et intervention, doit être réduit afin d'optimiser les conditions au cours de la phase d'évacuation, voir [figure 8, page 36](#). De plus, selon le niveau d'équipement installé dans le tunnel (détecteur de température linéaire, vidéosurveillance, détecteurs de fumées, etc.) et selon le niveau de surveillance, différentes stratégies peuvent être établies.

Il importe de comprendre que la meilleure stratégie à adopter dépend de la qualité et de la fiabilité des informations disponibles. Un des buts du système de commande de la ventilation en cas d'incendie est d'extraire les informations fiables. Ensuite, le premier défi consiste à passer de la commande en exploitation normale au mode incendie approprié.

En général, ce processus est dynamique et implique des étapes différentes selon la qualité et la quantité des informations obtenues, comme illustré à la [figure 10, page suivante](#). Une fois qu'une alarme incendie est détectée, la validation automatique ou manuelle de l'alarme est requise. Les actions menées dépendent des informations disponibles.

Une fois que l'alarme incendie est confirmée et que la stratégie de ventilation est définie, le système de commande doit être en mesure d'atteindre l'état prédéfini (par exemple une vitesse longitudinale donnée). Il peut être judicieux de mettre le système en état d'alerte et de démarrage avant même la confirmation de l'existence d'un incendie et de son emplacement.

strategy applied in case of a fire can be several minutes. Therefore, the overall safety is increased by considering all intermediate regimes when establishing the ventilation routines for normal operation.

► OVERVIEW OF THE CONTROL PROCESS

During normal operation the main objective of the control of ventilation is to maintain the air quality within pre-established values under consideration of operational costs. In contrast, fire is a rare event that is usually preceded by incidents such as breakdown or accident. Unfortunately, the transformation of these incidents to fire situations is faster than the processes related to normal operation. Therefore, the response of the operator and/or the automatic system must be rapid.

Consequently, the response time for the entire chain of events, i.e. detection, identification, alarm validation and intervention, must be reduced to optimize the conditions during the evacuation phase, see [figure 8, page 37](#). Furthermore, depending on the installed level of equipment (linear heat detector, CCTV, smoke detectors, etc) in the tunnel and the level of surveillance, different strategies can be established.

It is important to realize that the best strategy to be adopted depends on the quality and reliability of the information available. One of the goals of the ventilation control system in the case of fire is to extract the reliable information. Then the first challenge is the “change” from normal operational control to the appropriate fire mode.

In general, this process is dynamic and implies different steps depending on the different quality and quantity of information gained, as illustrated in [figure 10, next page](#). Once a fire alarm is detected, automatic or manual validation of the alarm is required. The actions taken depend on the available information.

Once the fire alarm is confirmed and the ventilation strategy is defined, the control system must be able to achieve the pre-defined condition (for example a particular longitudinal velocity). It may be appropriate to place the system in alert and starting condition, even before confirmation of fire and its position.

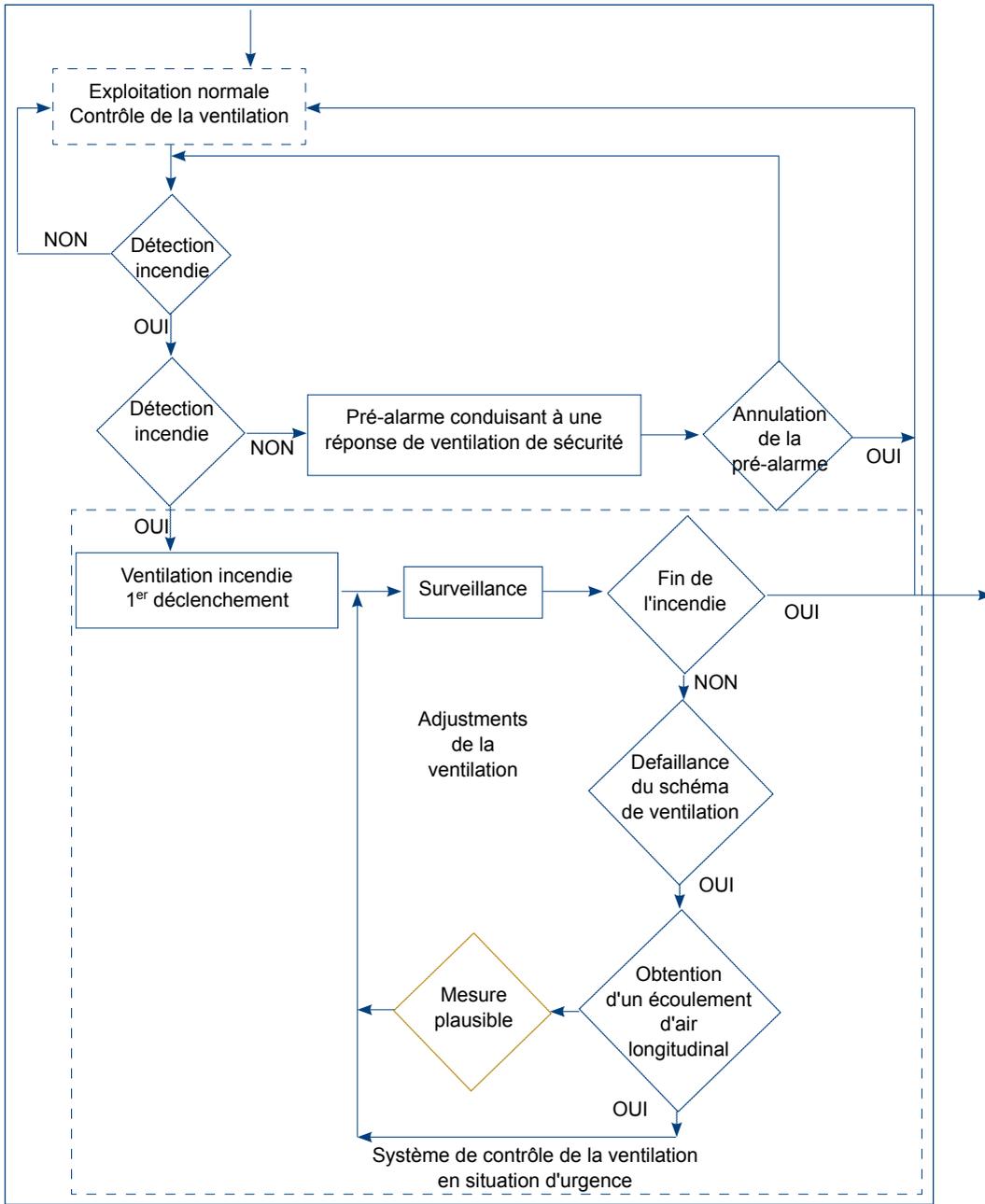


FIGURE10 - DÉTECTION DE L'INCENDIE ET PROCESSUS DE VALIDATION

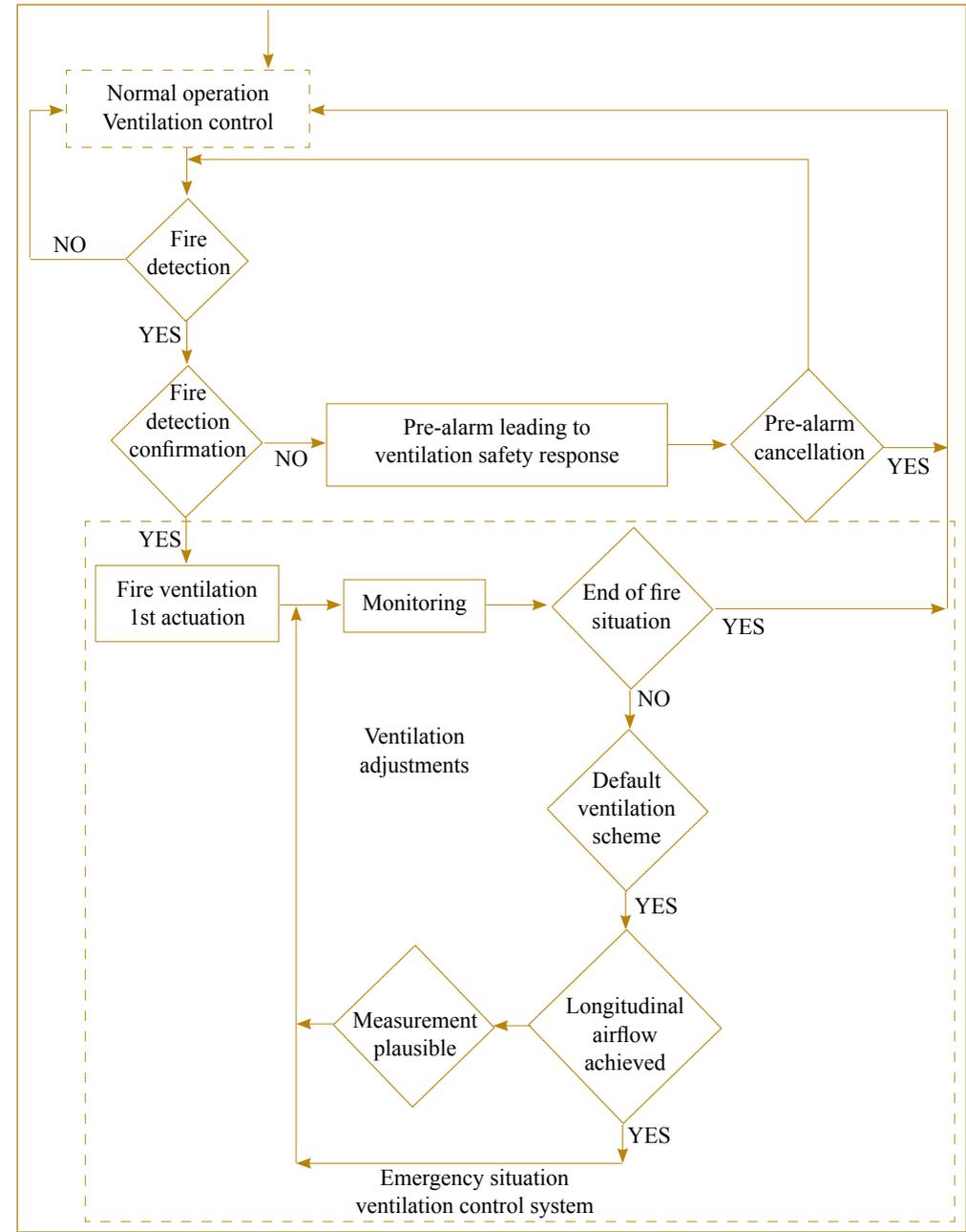


FIGURE 10 - FIRE DETECTION AND VALIDATION PROCESS



Certaines des tâches importantes des systèmes de commande utiles au cours de la phase d'évacuation sont les suivantes :

- valider l'existence d'un incendie ;
- déterminer l'emplacement de l'incendie et si possible sa nature ;
- décider quelle est la meilleure première action ;
- suggérer ou appliquer la meilleure réaction prédéfinie ;
- veiller à ce qu'en l'absence de mesures ou d'observations plausibles, le système par défaut soit un schéma de ventilation de compromis conçu pour réduire le risque au minimum.

Plans d'urgence

En cas d'alarme incendie, le plan d'urgence complet inclut au moins les actions suivantes :

- déclencher une alarme à l'intention des services d'intervention et de l'opérateur ;
- arrêter le trafic entrant dans le tube du tunnel où a lieu l'incendie ;
- arrêter le trafic entrant dans d'autres tubes du tunnel utilisés comme itinéraires d'évacuation ou accès pour les secours, et restreindre la vitesse du trafic approchant du tunnel ;
- mettre en fonctionnement la ventilation appropriée dans le tube où a lieu l'incendie ;
- mettre en fonctionnement une ventilation appropriée des itinéraires d'évacuation, par exemple un tube parallèle ;
- appliquer les réglages d'urgence pour l'éclairage du tunnel dans tous les tubes concernés ;
- informer les usagers du tunnel du comportement à avoir (par exemple panneaux à messages variables, hauts-parleurs, radio).

Le temps est crucial et le déclenchement immédiat de l'ensemble du plan d'urgence donne aux usagers du tunnel les plus grandes chances de survie. Cependant, certaines méthodes de détection d'incendie peuvent être trop peu fiables pour permettre l'application immédiate du plan complet prévu pour les incendies. Dans ce cas, le plan d'urgence peut être subdivisé en deux phases afin de donner du temps pour valider l'alarme. La détection de l'incendie est alors initialement considérée comme une « *pré-alarme* » qui entraîne au moins les actions suivantes :

- déclenchement d'une alarme à l'intention de l'opérateur ;
- mise en fonctionnement de la ventilation appropriée dans le tube où a lieu l'incident ;

Some of the important tasks of the control systems in order to help during the evacuation phase are:

- validate whether there is a fire,
- determine the fire location and if possible the type of fire,
- establish the best first action,
- suggest or apply the pre-defined best response,
- ensure that if there are no plausible measurements or observations, then the default is a compromise ventilation scheme that is deemed to minimize risk.

Emergency plans

In the case of a fire alarm, the full emergency plan includes at least the following actions:

- set off an alarm to the emergency services and the operator,
- stop traffic entering the incident tunnel tube,
- stop traffic entering other tunnel tubes used as escape routes or emergency access and restrict speed of traffic approaching tunnel,
- engage appropriate ventilation in the incident tube,
- engage appropriate ventilation of escape routes e.g. parallel tube,
- use emergency settings for the tunnel lighting in all concerned tubes,
- inform tunnel users of the appropriate behaviour (e.g. variable message signs, loudspeakers, radio).

Time is crucial and immediate engagement of the full emergency plan gives the tunnel users the highest chances of survival. However, some fire detection methods may be too unreliable to allow immediate engagement of the complete fire-response plan. In this case, the emergency plan can be divided into two phases in order to allow time for validation of the alarm. The fire detection is then initially classified as a "*pre-alarm*" that results in the following actions at least:

- set off an alarm to the operator,
- engage appropriate ventilation in the incident tube,



- application des réglages d'urgence pour l'éclairage du tunnel dans tous les tubes concernés.

L'opérateur se voit alors accorder un temps limité (pas plus de quelques minutes) pour évaluer la pré-alarme. Si l'opérateur ne réagit pas dans ce délai, la pré-alarme est considérée comme valable et tout le plan d'urgence est déclenché automatiquement.

Pour de plus amples informations, prière de se reporter au rapport AIPCR *Guide pour l'organisation, le recrutement et la formation du personnel d'exploitation des tunnels routiers* [17] et au *Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers, fascicule 5* du CETU, [18].

Principe de la réaction de la ventilation

La boucle de commande globale de l'interaction ventilation-tunnel inclut les éléments, équipements et capteurs à l'intérieur du tunnel ainsi que le système de commande proprement dit. Le système de commande doit constamment surveiller les paramètres commandés. Si un paramètre se situe hors de la plage de ses valeurs cibles, une mesure est prise, par exemple la mise en service d'un ventilateur. Les conséquences de cette commande sur la situation à l'intérieur du tunnel sont surveillées par les capteurs et l'information est réinjectée dans le système de commande. Cette boucle de commande à rétroaction est présentée à la *figure 9, page 54*. Des facteurs tels que l'effet de la longueur du tunnel sur la rapidité et la fiabilité des données de rétroaction doivent être pris en considération lors de la conception.

Les informations qui sont au minimum requises pour la réaction adéquate du système de ventilation en cas d'incendie dépendent du type de tunnel et de la situation du trafic. Pour un tunnel unidirectionnel sans congestion, savoir dans quel tube a lieu l'incident peut suffire pour déclencher la ventilation. En revanche, dans la plupart des cas, l'information relative à l'emplacement de l'incendie et aux vitesses de l'air est essentielle. La réaction est décidée en fonction de scénarios prédéterminés et les actions requises sont mises en œuvre.

Les programmes de commande de la ventilation devraient garantir une réaction appropriée pour tous les scénarios d'incendie concevables, y compris des puissances thermiques élevées ou faibles avec les productions de fumée associées. Des réactions doivent également être envisagées pour des scénarios où certains équipements ne sont pas disponibles ou bien où les données mesurées font défaut ou ne sont pas plausibles.

- use emergency settings for the tunnel lighting in all concerned tubes.

The operator is then allowed a limited time (no more than a few minutes) to evaluate the pre-alarm. If the operator does not react within this time, the pre-alarm is considered valid and the entire emergency plan is engaged automatically.

Further information can be found in PIARC report *Guide for Organising, Recruiting and Training Road Tunnel Operating Staff* [17] and the CETU document *Guide to road tunnel safety documentation, Booklet 5* [18].

Ventilation Response Principle

The overall control loop of the ventilation-tunnel interaction contains the elements, equipment and sensors inside the tunnel and the control system itself. The control system should continuously monitor the controlled parameters. If one parameter is outside the range of its target values, an action is taken e.g. setting fan operation. The reaction of this control command on the situation inside the tunnel is monitored by the sensors and the information is fed back to the control system. This feedback control loop is shown in *figure 9, page 55*. Factors such as the effect of the tunnel length on the speed and reliability of the feedback data need to be considered during the design.

The minimum information required for the appropriate reaction of the ventilation system in the case of a fire depends on the tunnel type and the traffic situation. For a unidirectional tunnel without traffic congestion, the knowledge of the incident tube can be sufficient to start the ventilation. However, in most cases the information of the fire location and the air velocities are crucial. The response is decided according to pre-defined scenarios and the required actions are taken.

The ventilation-control routines should ensure adequate response for all conceivable fire scenarios including high or low heat-release rates with associated smoke production. Responses also have to be considered for scenarios where some equipment is not available or where the measured data are lacking or implausible.



► DONNÉES DÉFINISSANT LES SCÉNARIOS D'INCENDIE ET DE VENTILATION

Détection des incendies

Un système de détection peut faire appel :

- à des capteurs de détection automatiques : développés spécifiquement pour la détection des incendies et de la fumée, ils émettent un signal d'alarme dès qu'un incident se produit (par exemple détection de chaleur, images vidéo, détection de fumée).
- au déclenchement humain : déclenchement manuel de l'alarme par l'opérateur à la suite d'informations appropriées émanant de sources telles que le système de vidéosurveillance (par exemple détection d'un incident ou de fumées), appels téléphoniques d'urgence, signaux venant de l'intérieur du tunnel (boutons d'appel d'urgence, décroché d'un extincteur, ouverture de portes, etc.) ou d'informations émanant des systèmes de détection automatiques si une réponse de l'opérateur est requise pour validation.
- à la détection indirecte (automatique) : ce type de détection est le résultat d'une interprétation logique et d'un processus de corrélation de signaux venant de sources différentes (concentration de CO et/ou de particules, vitesse de l'air, vitesse du trafic, etc.).

La détection est réalisée sur la base du dépassement de valeurs seuil pendant une durée prescrite. Il est utile d'inclure dans l'évaluation la vitesse à laquelle les mesures évoluent.

La détection d'un incendie est de la plus haute importance, car ne pas s'apercevoir d'un événement risque de faire perdre un temps précieux. En conséquence, cela implique qu'un certain nombre de fausses alarmes doivent être acceptées. Néanmoins, la génération d'un trop grand nombre de fausses alarmes pourrait fatiguer l'opérateur avec un résultat similaire (il les classerait sans y prêter trop d'attention). La fiabilité du système de détection d'incendie est donc très importante.

Dans ce contexte, il est important que différentes sections du tunnel soient identifiées sans ambiguïté, afin que les utilisateurs qui signalent un incendie puissent communiquer leur emplacement à l'opérateur avec précision. En particulier lorsque l'on utilise l'extraction de fumée, l'emplacement de l'incendie doit être détecté afin de mettre en œuvre la réaction correcte en matière de commande de la ventilation et de gestion du trafic. A cet égard, l'incendie peut ne pas être situé près du bouton poussoir, du poste d'appel d'urgence, de l'extincteur décroché ou la porte d'évacuation ouverte qui a déclenché l'alarme. Normalement, la détection

► INPUT DATA DEFINING FIRE AND VENTILATION SCENARIO

Fire Detection

A detection system could rely on:

- automatic detecting sensors: developed specifically for fire and smoke detection, they put out an alarm signal as soon as an incident is triggered (e.g. heat detection, CCTV information, smoke detection);
- human triggering: manual triggering of the alarm by the operator due to appropriate information from sources like CCTV (e.g. incident or smoke detection), emergency phone calls, signals from inside the tunnel (emergency buttons, fire extinguisher removal, doors opened, etc.) or from information from automatic detection systems if an operator response for validation is required;
- indirect (automatic) detection: this kind of detection would be the result of a logical interpretation and correlation process of signals coming from different sources (CO and/or particles concentration, air velocity, traffic speed, etc.).

Detection is conducted based on exceeding threshold values for a prescribed duration. It is useful to include the rates of change of the measurements in the evaluation.

The detection of a fire is of paramount importance since missing an event could mean the loss of precious time. This in turn implies that a certain number of false alarms have to be accepted. Nevertheless, generating too many false alarms could tire the operator with a similar result (cancelling them out without paying much attention). The reliability of the fire detection system is therefore very important.

In this context it is important that different sections of the tunnel are identified unambiguously, so that users who report fires can accurately convey their location to the operator. Particularly when using smoke extraction, the location of the fire needs to be detected in order to incorporate the correct response with respect to ventilation control and traffic management. In this respect, the fire may not be located near the push button, the emergency telephone, the retrieved fire extinguisher, or the opened emergency door which has triggered the alarm. Normally, smoke detection is less accurate in determining the location of the



des fumées est moins précise pour déterminer l'emplacement de l'incendie que ne l'est une alarme de température élevée utilisant un détecteur de température linéaire. La réaction provoquée par plusieurs détecteurs d'incendie indépendants sur un ou plusieurs systèmes doit être prise en compte. Cela concerne également la détection des feux mobiles (véhicules en feu qui se déplacent) car l'emplacement de la détection initiale de l'incendie peut ne pas être le même que celui où le véhicule s'arrête (en particulier les informations récupérées au moyen du système de vidéosurveillance et de la détection des fumées).

Normalement, la réaction doit être organisée selon une hiérarchie donnant à des signaux particuliers des priorités plus élevées pour définir le scénario d'incendie. Par exemple, dans un tunnel équipé de détecteurs de fumée, de détecteurs de chaleur linéaires, de vidéosurveillance, d'opacimètres, etc., il convient de formuler un processus décisionnel donnant les indications les plus fiables quant à l'emplacement de l'incendie. Cela est particulièrement important dans le cas où le désenfumage recourt à des trappes de désenfumage télécommandées.

Le rapport AIPCR *Systèmes et équipements pour la maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers* [14], donne de plus amples informations sur ce sujet.

Vitesse du courant d'air dans le tunnel (anémomètre)

Si l'on envisage une commande active du système de ventilation, la vitesse longitudinale de l'air doit être mesurée. Dans ce cas, la qualité et la fiabilité des mesures de vitesse de l'air sont de la plus haute importance, étant entendu que les fumées influent sur les mesures faites par l'anémomètre. Ainsi, l'influence de la stratification (qui peut entraîner un courant d'air à contre-sens) sur la vitesse longitudinale mesurée doit être prise en compte par le concepteur du système de commande. Des mesures de courant d'air erronées peuvent mettre en danger les usagers du tunnel. C'est pourquoi un contrôle automatique de vraisemblance des vitesses d'air mesurées est requis avant de mettre en œuvre tout contrôle actif du courant d'air longitudinal, afin de garantir que l'on dispose d'un ensemble cohérent de valeurs mesurées. Cela peut se faire de nombreuses manières. Par exemple, en comparant les signaux venant de plusieurs capteurs, en comparant avec des valeurs historiques ou de conception, avec la situation spécifique, etc., on peut établir la cohérence des signaux et en déduire les valeurs les plus fiables.

Une réaction appropriée du système de ventilation doit également être prévue s'il n'existe aucune mesure de vitesse d'air fiable, par ex. par des plans d'urgence appropriés.

fire than is a high temperature alarm using a linear heat detector. Moreover, the reaction due to several independent fire detectors by one or more systems has to be considered. This concerns also the detection of moving fire sources (moving vehicles on fire) as the location of the initial detection of the fire might not be the same as the location where the vehicle comes to a standstill (in particular information retrieved from CCTV and smoke detection).

Normally, the response has to be organized in a hierarchy such that particular signals have higher priorities in defining the fire scenario. For example, in a tunnel equipped with smoke detectors, linear heat detectors, CCTV, opacity meters, etc., a decision process should be formulated which gives the most reliable guidance with regard to fire location. This is particularly important in the case where smoke extraction is through the use of remotely controlled dampers.

PIARC report *Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels* [14] provides further information on this topic.

Tunnel Air Flow Velocity (Anemometer)

If there is an intention to have active control of the ventilation system, then the longitudinal air velocity should be measured. In this case, the quality and reliability of the flow measurements is of utmost importance bearing in mind that the smoke influences the measurements made by the anemometer. For example, the influence of stratification (which may induce counter flow) on measured longitudinal velocity should be considered by the control system designer. Erroneous flow measurements can endanger the situation for the tunnel users. Therefore, an automatic plausibility check of the flow measurements is called for prior to engaging any active control of the longitudinal flow to ensure that a consistent set of measurement values are available. This may be done in a number of ways. For example, by comparing signals from several sensors, comparison with historical or design values, the specific situation etc. the coherency of the signals can be established and from these the most reliable values can be deduced.

An adequate reaction of the ventilation system must also be ensured if no reliable flow measurements exist e.g. by appropriate contingency plans.



La vitesse initiale du courant d'air à l'intérieur du tunnel peut être causée par le mouvement du trafic, l'action du vent sur les têtes, l'effet cheminée à l'intérieur du tunnel (ou l'effet cheminée inversé) et la différence de pression barométrique entre les têtes. Dans une période transitoire initiale, le mouvement des fumées est influencé par des effets dus au trafic, mais puisque le trafic est arrêté en cas d'incendie, cet effet finit par disparaître. Si l'évaluation de la vitesse du courant d'air à l'intérieur du tunnel due à des effets naturels (à savoir vent, effet cheminée et pression barométrique) repose sur des mesures de vitesse d'air, la véritable vitesse dans le scénario d'incendie peut être mal interprétée du fait que l'effet du trafic est encore présent dans les valeurs mesurées initialement.

Une fois installés dans le tunnel, les anémomètres doivent être étalonnés (par exemple par des mesures in situ selon la norme ISO 5802) de manière que leurs lectures finales correspondent à la vitesse moyenne du courant d'air dans la section du tunnel. Les capteurs doivent fournir la valeur correcte de la vitesse de l'air aux sections pertinentes et ne doivent pas être affectés par le fonctionnement des ventilateurs, les niches et d'autres équipements comme les panneaux de signalisation.

Données sur les systèmes de ventilation

Dans le cas d'extraction des fumées, la connaissance de la performance des ventilateurs (contrôlée périodiquement par des tests de routine) ou la mesure du débit extrait peut être utile pour des contrôles de vraisemblance des anémomètres.

Situation du trafic

En cas de trafic unidirectionnel, il est important de savoir si le trafic en aval de l'incendie peut ou non quitter le tunnel sans entrave, puisque cela a une influence sur la stratégie de ventilation à appliquer. Les méthodes suivantes peuvent être adoptées :

- surveiller continuellement le trafic et supposer qu'il est congestionné, si c'était le cas avant la détection de l'incendie ;
- contrôler le trafic à la tête de sortie : si le trafic se déplace continuellement à des vitesses supérieures à 20 km/h par exemple, alors le tunnel sera réputé ne pas être congestionné. Le rapport AIPCR de 1987 [19] décrit les conditions de trafic dans un tunnel. Notons que ce qui est appelé trafic congestionné dans le présent document est un trafic extrêmement congestionné dans le document [19]. 20 km/h est la valeur de seuil pour ce que le présent document considère comme une exploitation non congestionnée ;

The initial flow velocity inside the tunnel may be caused by traffic movement, wind action on portals, stack effect inside tunnel (or reversed stack effect) and barometric pressure difference between the portals. The smoke flow is influenced in an initial transient period by traffic effects but, since the traffic is stopped in the event of fire, this effect will eventually disappear. If the evaluation of the flow velocity inside the tunnel due to natural effects (i.e. wind, stack effect and barometric pressure) is based on measurements of flow speed, the real speed in the fire scenario may be misinterpreted because the effect of traffic is still present in the initial measurement.

When installed in the tunnel, the anemometers have to be calibrated (e.g. with in-situ measurements according to ISO 5802) such that their end-readings correspond to the average flow velocity in the tunnel section. The sensors must deliver the correct value of the airflow at the relevant sections and must not be affected by running fans, niches and other equipment such as traffic signs.

Ventilation Systems Data

In the case of smoke extraction, knowledge of the fan performance (checked periodically through routine testing) or measurement of the extract flow can be useful for plausibility checks of the anemometers.

Traffic Situation

In the case of unidirectional traffic, it is important to know whether or not the traffic downstream of the fire can leave the tunnel unhindered, as it has an influence on the ventilation strategy to be applied. The following methods can be adopted:

- continuously monitor the traffic flow and assume traffic congestion, if this was the case prior to the fire detection;
- monitor the traffic at the exit portal: if the traffic is continuously moving at speeds above, say 20 km/h then the tunnel would be deemed not to be congested. PIARC 1987 report [19] describes traffic conditions in a tunnel. Note that what is called congested traffic in the present document is extremely congested traffic in the document [19]. 20 km/h is the threshold value for what this document takes to be non-congested operation;



- si aucune information fiable sur la situation du trafic n'est disponible, il est conseillé de choisir l'option la moins favorable. Dans la plupart des cas, cela correspond à la situation congestionnée. Cependant, dans les tunnels où le trafic est léger ou le nombre de véhicules peu élevé, il est possible de prendre pour hypothèse la situation non congestionnée.

Autres données

D'autres données sont parfois utiles pour faciliter la commande de la ventilation, par exemple les températures intérieures et extérieures, le vent, la visibilité et les fumées à l'extérieur du tunnel.

► MISE EN ŒUVRE DE LA COMMANDE EN CAS D'INCENDIE

L'application d'une stratégie de ventilation particulière dépend de l'emplacement de l'incendie par rapport aux équipements de ventilation et de la configuration d'ensemble du système de ventilation.

Au cours de la conception d'un système de ventilation, le concepteur propose normalement les procédures d'exploitation permettant à l'opérateur de toujours être à même de mettre en œuvre la séquence complète pour n'importe quelle urgence donnée. Le concepteur devrait rechercher les solutions de commande les plus efficaces compte tenu de la complexité du système de ventilation et des procédures qu'un opérateur est capable de mettre en œuvre correctement dans des conditions de stress. L'opérateur devrait également avoir la possibilité d'intervenir sur la procédure en cours à tout moment s'il a connaissance soit que l'alarme est fautive, soit que la procédure est inadaptée. Cependant, il est très important de souligner que l'intervention dans un processus automatique en cours devrait être évitée sauf si l'opérateur est pleinement conscient des conséquences de ses actes et est autorisé à intervenir.

La réaction d'un système de ventilation à un incident détecté et validé devrait satisfaire aux exigences définies au [chapitre "Stratégie de gestion des fumées pour la phase d'auto-sauvetage", page 42](#). Il est de la plus haute importance de parvenir à une réaction stable de la ventilation. De fortes oscillations pourraient entraîner des courants d'air inappropriés dans le tunnel. Il est recommandé qu'aucun changement ne soit apporté à la procédure de désenfumage en cours sauf si :

- les mesures des variables de contrôle montrent clairement que le scénario d'incendie a été mal compris et donnent à penser qu'il conviendrait d'en utiliser un autre ;

- If no reliable information about the traffic situation is available, the less favourable option should be chosen. In most cases this would be the congested situation. However, in tunnels with light traffic or few vehicles, the non-congested situation might be assumed.

Further Data

Further data are sometimes useful in order to facilitate ventilation control for example, inside and outside temperatures, wind, visibility and smoke external to the tunnel.

► IMPLEMENTATION OF CONTROL PROCEDURE IN THE CASE OF FIRE

The application of a particular ventilation strategy depends on the location of the fire with respect to the ventilation equipment and the overall layout of the ventilation system.

During the design of a ventilation system the designer would normally propose the procedures for operation so that the operator will always be able to follow the entire sequence for any given emergency. The designer should also investigate the most efficient control solutions, considering the ventilation system complexity, and the procedures that an operator under stressful conditions would have to undertake correctly. The operator should also have the possibility of intervening with the ongoing procedure at any time if they have knowledge of either the alarm being false or the procedure being inadequate. However, it is very important to stress that intervention of an ongoing automatic process should be avoided unless the operator is fully aware of the consequences of their action and is authorised to do so.

The response of a ventilation system to a detected and validated incident should be in line with the requirements defined herein (see sub-section "[Smoke-management strategies for the self-rescue phase", page XX](#)). It is of utmost importance that a stable ventilation response is achieved. Strong oscillations might result in inadequate airflows inside the tunnel. It is recommended that no changes are made to the ongoing smoke control procedure unless:

- the measurements of the control variables show clearly that the fire scenario was misunderstood and point to a new fire scenario;



- l'examen des variables de contrôle montre que la réaction de la ventilation au scénario d'incendie est insuffisante pour plusieurs raisons et qu'aucune situation stable ne peut être atteinte ;
- les mesures ou autres sources d'informations sont fiables et il n'existe aucun risque qu'elles puissent être affectées par l'incendie ;
- la modification de la procédure ne fait pas courir de risques aux personnes se trouvant à l'intérieur du tunnel, notamment les services d'intervention.

Seule la personne habilitée peut prendre la responsabilité d'intervenir dans la procédure.

La vue d'ensemble du système de ventilation exige de prendre en compte plusieurs aspects :

- l'exploitation normale diffère de l'exploitation d'urgence, et des modes de commande différents pourraient être spécifiés ;
- l'exploitation d'urgence peut exiger des priorités différentes en ce qui concerne le statut des équipements. Protéger les équipements est normal, mais pas en situation d'urgence : la priorité donnée par exemple à la protection thermique ou vibratoire d'un ventilateur sera ignorée en cas d'incendie. Une capacité de réserve devrait être fournie afin que la défaillance de certains équipements soit acceptable ;
- en raison de phénomènes transitoires, l'information doit être traitée avec soin et tenir compte des aspects dynamiques ;
- la redondance des équipements et des informations est recommandée pour permettre au système d'être fiable ;
- les procédures prévues lors de la conception doivent tenir compte de modes dégradés, notamment la perte de certains équipements ;
- mise en route automatique des équipements de secours en cas de défaillance. Ceci doit se traduire dans les procédures pour la ventilation d'urgence ;
- vérification que les données locales ne sont pas en conflit avec les exigences du système ; par exemple le capteur de température sur une trappe de désenfumage peut empêcher la télécommande de sa manœuvre ;
- fermeture au trafic des tubes où ont lieu l'incendie et les opérations de secours ;
- en cas d'incendie, tenir un certain compte du trafic urbain en dehors du tunnel afin d'assurer la sécurité aux têtes, de faciliter l'évacuation et l'accès des services d'incendie ;
- la préférence doit être donnée aux systèmes simples, stables, fiables et robustes.

- the monitoring of the control variables show that the ventilation response to the fire scenario is inadequate due to various reasons and no stable control behaviour can be reached;
- the measurements or other information sources are reliable and there is no risk of being affected by the fire;
- the correction of the procedure does not put people inside the tunnel at risk, including the emergency services.

Only the person in charge may take the responsibility of intervening in the procedure.

The overall view of the ventilation system requires consideration of several aspects:

- normal operation differs from emergency operation and different control modes might be specified;
- emergency operation may require different priorities with regard to equipment status. Safeguarding of equipment in normal but not in emergency operation, prioritizing – e.g. bearing temperatures/vibration status of fan would be ignored in case of fire emergency. Standby capacity should be provided so that failure of some equipment is acceptable;
- due to transient phenomena, information must be treated with care, acknowledging the dynamic aspects;
- redundancy of equipment and information should be available for a reliable system;
- design response should accept degraded modes, taking into account the loss of equipment;
- automatic operation of back-up equipment in case of failure. This is a reflection of procedure for emergency ventilation;
- verification that local data is not in conflict with system requirements; e.g. temperature sensor on damper may prohibit remote operation;
- closure of fire and rescue tubes to traffic;
- in the case of fire some consideration of urban traffic outside the tunnel to ensure safety at portals, easy exiting and access of the fire service;
- simple, stable, reliable and robust systems are to be preferred.



ESSAIS

▶ ESSAIS DE MISE EN SERVICE

Une campagne complète d'essais du système de ventilation dans un tunnel routier devrait inclure les étapes progressives suivantes :

- vérification individuelle des équipements (ventilateurs, trappes de désenfumage, etc.),
- capacité à parvenir aux exigences de dimensionnement définies dans les spécifications du projet (essais de caractérisation), et enfin
- vérification de l'adéquation aux stratégies globales de ventilation.

La première étape, composée généralement d'essais portant sur des composants individuels, est réalisée par le fabricant lors des essais en usine. Leur objectif est de certifier que toutes les exigences des équipements sont satisfaites. Des organismes indépendants ou bien le client et l'agent de sécurité doivent certifier les résultats de ce processus qui spécifie également certains aspects du programme d'essais.

La deuxième étape (caractérisation) doit permettre la vérification des capacités in situ telles que définies dans le projet. En mesurant la vitesse de l'air dans le tunnel et les gaines (en cas de systèmes transversaux), les objectifs devraient inclure :

- la vérification de la performance et des appels de puissance électrique des équipements de ventilation (accélérateurs, ventilateurs axiaux, etc.) une fois installés dans différentes configurations ;
- l'évaluation des paramètres aérodynamiques du tunnel et de la capacité maximale du système ;
- en cas de système transversal, il est également recommandé de vérifier la performance correcte des gaines d'air frais et d'air vicié dans les diverses positions des registres pour vérifier que les vitesses d'air obtenues dans chaque cas correspondent aux valeurs de projet ;
- des essais fonctionnels devraient faire la preuve du fonctionnement coordonné des ventilateurs et des registres d'isolement, du fonctionnement tel que prescrit des registres de commande, du fonctionnement des ventilateurs dans la bonne direction, etc.

La méthodologie pour les essais et les procédures peut varier en fonction du système de ventilation (longitudinal, transversal, etc.).

TESTING

▶ COMMISSIONING TESTS

A complete campaign of tests of the ventilation system in a road tunnel should include progressive steps:

- the individual verification of equipment (fans, dampers, etc),
- the capacity to achieve the dimensioning requirements defined in the specifications of the project (characterization tests), and finally
- the verification of the correct adaptation to the global strategies of ventilation.

The first step, usually comprising individual component tests, is carried out by the manufacturer during factory tests. Their goal is to certify that all the requirements of the equipment are fulfilled. Independent organizations or the Client and the Safety Officer in charge must certify the results of this process that also specifies certain aspects of the testing program.

The second step (characterization) must allow the verification of the in-situ capabilities as defined in the project. By measuring the air velocity in the tunnel and the ducts (in case of transverse systems) the goals should include:

- verification of the performance and electrical power requirements of the ventilation equipment (jet fans, axial fans, etc) once installed in different configurations;
- evaluation of the aerodynamic parameters of the tunnel and the maximum capacity of the system;
- in the case of a transverse system it is also recommended to verify the correct performance of the inlet and exhaust air ducts under different positions of the dampers to check that the airflows obtained in each case is the same as projected.
- functional tests should demonstrate the coordinated operation of fans and isolation dampers, the prescribed operation of control dampers, the operation of fans in the correct direction, etc.

Depending of the ventilation system (longitudinal, transverse, etc) the methodology for testing and procedures can vary.



La troisième étape inclut différentes vérifications portant sur la fonctionnalité du système. Les essais visent directement à prouver l'obtention des stratégies de ventilation définies dans la phase de conception. Tout le processus doit inclure non seulement la vérification du comportement aérodynamique du système, mais aussi la mise en œuvre adéquate du logiciel qui commande les différents systèmes. Un essai de l'ensemble du système (déclenchement de l'alarme – réaction du système) pour chacun des scénarios d'incendie prédéfinis (en fonction de l'emplacement) est requis, par exemple :

- vérification de la bonne réaction à l'alarme incendie en fonction de la méthode de détection ;
- vérification du contrôle actif de la vitesse longitudinale y compris essais de la réaction du système en cas de mesures inexactes et d'équipements défectueux.

Souvent, des essais de fumées froides et chaudes (par exemple fumées émanant de la combustion d'un bac de carburant ou d'un véhicule léger) ou des exercices de coordination sont également réalisés. Différents textes nationaux demandent des essais avec fumées chaudes (par ex. Autriche RVS 09.03.31 [3]). Les essais avec fumées chaudes constituent le seul moyen de voir comment l'ensemble du système fonctionne en mode d'incident. Les essais avec fumées chaudes devraient être effectués dans des sections critiques du tunnel.

► ESSAIS PÉRIODIQUES DU SYSTÈME

Des essais devraient être entrepris pour confirmer le bon fonctionnement de l'ensemble du système. Ils devraient être réalisés périodiquement, d'ordinaire au moins une fois par an et sur la base d'un scénario réaliste incluant toute la chaîne des événements depuis le déclenchement de la procédure d'urgence par l'opérateur à la suite de la détection de l'incident, jusqu'à la réaction opérationnelle de la ventilation.

Les essais fonctionnels portant sur les équipements devraient inclure :

- l'étalonnage des divers capteurs de pollution et des anémomètres ;
- des actions télécommandées depuis les armoires électriques locales ;
- l'asservissement de la vitesse de ventilation aux données fournies par les capteurs de pollution ;
- la vérification du système de détection automatique d'incendie, en simulant un incendie en divers points du tunnel ;
- l'activation des dispositifs d'évacuation des fumées concernés lorsqu'ils sont mis en action par le poste de contrôle-commande qui identifie une situation d'incendie ;

The third step includes different verifications of the functionality of the system. The tests are directly involved in proving the achievement of the ventilation strategies defined in the design phase. The whole process should include not only the verification of the aerodynamic behaviour of the system but also the adequate implementation of the software that controls the different systems. A test of the whole system (alarm triggering – system response) for each of the pre-defined fire scenarios (dependent on the location) is required, e.g.:

- verification of correct fire alarm response depending on detection method,
- verification of active control of longitudinal velocity including testing the reaction in the cases of inaccurate measurements and equipment failures.

Often cold and hot smoke tests (e.g. smoke from a fuel tray or light vehicle fire) or coordination exercises are also developed. Different national guidelines call for hot smoke tests (e.g. Austria RVS 09.03.31 [3]). Hot smoke tests are the only way to see how the whole system is performing in an incident mode. The hot smoke tests should be performed in the critical sections of the tunnel.

► PERIODIC SYSTEM TESTS

Tests should be undertaken to confirm the correct functionality of the entire system. These should be done periodically, typically at least once a year and based on a realistic scenario including the full chain of events from operator emergency procedural response following incident detection to ventilation operation response.

Functional tests of the equipment should include:

- calibration of the different pollution sensors and the anemometers;
- remote control commands from the local electrical cabinets;
- control of ventilation speed based on the data supplied by the pollution sensors;
- automatic fire detection system, inspected by simulating a fire at different points in the tunnel;
- activation of the smoke evacuation devices concerned when actuated by the control/command station identifying a fire situation;



- des essais de commande à distance des ventilateurs ou accélérateurs depuis les boîtiers de commande pour pompiers (s'il en est installé) ;
- le fonctionnement des équipements en mode dégradé ;
- le fonctionnement et la commande des trappes d'extraction des fumées.

Des exercices en vraie grandeur dans des conditions aussi réalistes que possible devraient être entrepris au moins tous les quatre ans. La fermeture du tunnel ne sera requise que si des dispositions acceptables peuvent être prises pour détourner le trafic. Des exercices partiels et/ou de simulation devraient être réalisés toutes les années intermédiaires. Dans les zones où plusieurs tunnels sont situés à proximité immédiate les uns des autres, un exercice en vraie grandeur devrait être réalisé dans au moins un de ces tunnels.

► ESSAIS DE SYSTÈME BASÉS SUR DES MODÉLISATIONS

Il existe des outils de simulation qui calculent le champ de vitesse instationnaire de systèmes de tunnel, même complexes. De plus, les programmes de commande peuvent être modélisés tant pour l'exploitation normale que pour des scénarios d'incendie. De tels outils peuvent servir à réaliser des essais détaillés en usine du système de commande en « remplaçant » le véritable tunnel par un modèle informatique. De cette façon, il est probable que les essais seront bien plus élaborés que si l'on s'appuie seulement sur des tests in situ, ce qui en accroît donc la fiabilité. Ceci ne peut toutefois remplacer les essais du système et les exercices en vraie grandeur tels que spécifiés au [paragraphe Essais périodiques du système, page précédente](#).

► MAINTENANCE

Le système de commande et le système de ventilation nécessitent une maintenance régulière.

Le système de commande est tributaire des informations correctes fournies par les capteurs. Toutefois, les capteurs ne fournissent des données fiables que s'ils sont entretenus et étalonnés régulièrement. Des procédures automatiques peuvent être utilisées pour examiner la vraisemblance des mesures des capteurs.

Les équipements de ventilation, tels que ventilateurs et trappes de désenfumage, devraient être mis en marche à intervalles réguliers et être testés au moins une fois par an.

- execution of remote control commands from the fireman's control switch boxes (if installed) to the jet fans/fans;
- performance of the facilities in degraded mode;
- performance and control of the smoke venting dampers.

Full scale exercises under conditions that are as realistic as possible should be undertaken at least every four years. Tunnel closure will be required only if acceptable arrangements can be made for diverting traffic. Partial and/or simulation exercises should be conducted every year in between. In areas where several tunnels are located in close proximity to each other, a full scale exercise should be conducted in at least one of those tunnels.

► MODEL BASED SYSTEM TESTS

Simulation tools are available that compute the unsteady flow field of even complex tunnel systems. Furthermore, the control routines can be modelled both for normal operation and for fire scenarios. Such tools can be used to conduct detailed factory tests of the control system by “replacing” the real tunnel with the computational model. Doing this, the tests are likely to be much more elaborate than relying only on in-situ tests and thereby increase the reliability. However this cannot replace system tests and full scale exercises as specified in *"Periodic system tests", previous page*.

► MAINTENANCE

The control system and the ventilation system need regular maintenance.

The control system relies on correct information from sensors. However, sensors deliver reliable data only if they are maintained and calibrated on a regular basis. Automatic procedures can be used to examine the plausibility of the sensors.

The ventilation equipment such as fans and dampers should be engaged at regular intervals and tested at least once a year.

CONCLUSIONS

Le présent document examine les aspects touchant à l'exploitation en situation d'urgence des systèmes de ventilation dans les tunnels et tient compte des tendances récentes observées au niveau de la conception.

Les types de systèmes de ventilation, longitudinal, transversal, etc. sont décrits, et les objectifs correspondants pour la maîtrise des fumées sont définis en fonction des différentes conceptions possibles. Cela s'inscrit dans le contexte de scénarios d'incendies typiques, en distinguant les diverses phases du développement d'un incendie : allumage, auto-évacuation, évacuation assistée et lutte contre l'incendie. Des stratégies différentes sont requises au cours de ces phases afin de fournir un environnement qui réduise autant que possible les risques pour les occupants du tunnel.

Une attention particulière devrait être portée :

- aux tunnels congestionnés et aux tunnels bidirectionnels, où une ventilation longitudinale seule, sans gaine d'extraction des fumées, pourrait conduire à un risque inacceptable,
- aux tunnels soumis à des conditions de pression atmosphérique particulières (comme des tunnels de montagne), où la vitesse naturelle de l'air peut être très élevée et rendre le désenfumage difficile sans équipements tels que des accélérateurs destinés à éviter que les fumées ne se répandent.

La commande de la ventilation en cas d'incendie est un processus actif, dont le point de départ est le mode spécifique d'exploitation normale conditionné par le trafic, le vent et les autres conditions de l'environnement. Cet état initial étant donné, le processus de commande, qu'il soit totalement automatique ou manuel, nécessite de modifier le fonctionnement du système de ventilation afin d'atteindre l'objectif souhaité. Les boucles de commande utilisées habituellement pour ce processus sont décrites, et l'accent est mis sur la nécessité de valider et d'interpréter les informations présentées au système de commande.

Une analyse particulière est recommandée pour rechercher les méthodes de gestion de l'incendie les plus efficaces en tenant compte de la complexité du système de ventilation et des procédures que l'opérateur doit exécuter dans des conditions de fort stress.

Afin de garantir que les opérations escomptées seront menées à bien, il est nécessaire de réaliser une maintenance et des essais à intervalles réguliers.

CONCLUSIONS

This document presents a review of the emergency operational aspects of ventilation systems in tunnels and takes account of recent trends in design.

The types of ventilation systems, longitudinal, transverse etc. are described and the corresponding objectives for smoke control defined in terms of the different possible designs. This is done in the context of typical fire scenarios, distinguishing the phases of fire development: ignition, self-evacuation, assisted evacuation and fire fighting. Different strategies are required during these phases in order to provide an environment that minimizes the risk to tunnel occupants.

Particular attention should be paid to:

- congested tunnels, and bi-directional tunnels, where pure longitudinal ventilation, without a smoke exhaust duct might represent an unacceptable risk;
- tunnels under particular pressure conditions (such as mountain tunnels), where the natural air velocity may be very high, making smoke management difficult without equipment such as jet-fans to prevent smoke spreading.

The control of ventilation during a fire emergency is an active process, with its starting point the specific mode of normal operation as affected by traffic, wind and other environmental conditions. Given this initial condition, the control process, whether it is fully automatic or manual, needs to change the operation of the ventilation system to achieve the desired objective. Typical control loops that determine this process are described and emphasis is placed on the need to validate and interpret the information that is presented to the controller.

Particular analysis should be done to investigate the most efficient fire management methods with consideration of the complexity of the ventilation system, and the procedures that the operator has to execute under high stress conditions.

To ensure that the expected operation is achieved, maintenance and testing on a regular basis is required.



RÉFÉRENCES

- [1] COMITE TECHNIQUE AIPCR DE L'EXPLOITATION DES TUNNELS ROUTIERS, *Maîtrise de l'incendie et des fumées dans les tunnels routiers, référence 05.05.B, AIPCR, Paris, 1999.*
- [2] UNION EUROPEENNE, *Directive 2004/54/CE du Parlement européen et du Conseil concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier transeuropéen, Bruxelles, 2004.*
- [3] RVS 09.02.31, *Tunnelausrüstung, Belueftung Grundlagen [Equipment, ventilation, principes de base pour les tunnels], Oesterreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene und Verkehr, Karlsgasse 5, Vienna, Autriche, 2006*
- [4] RABT, *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, publié par Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen e.V., Cologne, Allemagne, ISBN 3-937356-87-8, 2006.*
- [5] OFROU, *Ventilation des tunnels routiers, Suisse, 2004 amendé en juillet 2006 (en allemand et en français), 2004/2006*
- [6] CETU, *Instruction technique annexée à la circulaire 2000-63, CETU, Bron, France, 2000 (en anglais et en français)*
- [7] CETU, *Dossier pilote des tunnels – Ventilation, ISBN 2-11-084740-9, CETU, Bron., France, 2003*
- [8] CENTRE NEERLANDAIS POUR LA SECURITE DES TUNNELS - RIJKSWATERSTAAT, *Aanbevelingen Ventilatie van Verkeerstunnels, Pays-Bas, décembre 2005*
- [9] COMITE TECHNIQUE AIPCR DE L'EXPLOITATION DES TUNNELS ROUTIERS, *Tunnels routiers : émissions des véhicules et besoins en air pour la ventilation, référence 05.14.B, AIPCR, Paris, 2004*
- [10] COMITE TECHNIQUE AIPCR DE L'EXPLOITATION DES TUNNELS ROUTIERS, *Tunnels routiers : guide pour l'optimisation de l'impact sur la qualité de l'air dans l'environnement, référence 2008R04, AIPCR, Paris, 2008.*
- [11] JACQUES E., POSSOZ L., *Some experience with ventilation control based on traffic data, proceedings of the 2nd International Conference on Tunnel Control & Communication, Independent Technical Conferences, Ltd., Amsterdam, pp.235-251, 1997.*
- [12] JACQUES E., *Commande de la ventilation basée sur des caractéristiques du trafic mesurées directement, XXIe Congrès mondial de la Route, AIPCR, Kuala Lumpur, Malaisie, 1999*
- [13] JACQUES E., POSSOZ L., *Designing an expert system to control tunnel ventilation based on directly measured traffic characteristics, proceedings of the 10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHR Group, Cranfield, UK, pp.81-95, ISBN 1 86058 255 9, 2000*
- [14] COMITE TECHNIQUE AIPCR DE L'EXPLOITATION DES TUNNELS ROUTIERS, *Systèmes et équipements pour la maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers, référence 05.16.B, PIARC, Paris, 2007*
- [15] COMITE TECHNIQUE AIPCR DE L'EXPLOITATION DES TUNNELS ROUTIERS, *Tunnels routiers : Evaluation des systèmes fixes de lutte contre l'incendie, référence 2008R07, AIPCR, Paris, 2008*

REFERENCES

- [1] PIARC TECHNICAL COMMITTEE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS *Fire and Smoke Control in Road Tunnels, reference 05.05.B, PIARC, Paris, 1999.*
- [2] EUROPEAN UNION, *Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network, Brussels, 2004.*
- [3] RVS 09.02.31, *Tunnelausrüstung, Belueftung Grundlagen [Tunnel equipment, ventilation, basic principles], Oesterreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene und Verkehr, Karlsgasse 5, Vienna, Austria, 2006.*
- [4] RABT, *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, published by Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen e.V., Cologne, Germany, ISBN 3-937356-87-8, 2006.*
- [5] FEDRO, *Ventilation of road tunnels, Switzerland, 2004 with amendment July 2006 [German and French], 2004/2006.*
- [6] CETU, *Technical instruction in annex to Circular 2000-63, CETU, Bron, France, 2000 [French and English].*
- [7] CETU, *Dossier pilote des tunnels – Ventilation, ISBN 2-11-084740-9, CETU, Bron., France, 2003.*
- [8] DUTCH CENTRE FOR TUNNEL SAFETY - RIJKSWATERSTAAT, *Aanbevelingen Ventilatie van Verkeerstunnels, Netherlands, 2005.*
- [9] PIARC TECHNICAL COMMITTEE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS *Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation, reference 05.14.B, PIARC, Paris, 2004.*
- [10] PIARC TECHNICAL COMMITTEE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS *Road Tunnels: A Guide to Optimising the Air Quality Impact upon the Environment, PIARC reference 2008R04, Paris, 2008.*
- [11] JACQUES E., POSSOZ L., *Some experience with ventilation control based on traffic data, proceedings of the 2nd International Conference on Tunnel Control & Communication, Independent Technical Conferences, Ltd., Amsterdam, pp.235-251, 1997.*
- [12] JACQUES E., *Ventilation control based upon directly measured traffic characteristics, XXIst World Road Congress, PIARC, Kuala Lumpur, Malaysia, 1999.*
- [13] JACQUES E., POSSOZ L., *Designing an expert system to control tunnel ventilation based on directly measured traffic characteristics, proceedings of the 10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHR Group, Cranfield, UK, pp.81-95, ISBN 1 86058 255 9, 2000.*
- [14] PIARC TECHNICAL COMMITTEE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS *Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels, reference 05.16.B, PIARC, Paris, 2007.*
- [15] PIARC TECHNICAL COMMITTEE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS *Road Tunnels: An assessment of fixed fire fighting systems, reference 2008R07, PIARC, Paris, 2008.*

- [16] COMITE TECHNIQUE AIPCR DE L'EXPLOITATION DES TUNNELS ROUTIERS, *Systèmes de gestion des incidents de la circulation dans les tunnels routiers, référence 05.15 B, AIPCR, Paris, 2004*
- [17] COMITE TECHNIQUE AIPCR DE L'EXPLOITATION DES TUNNELS ROUTIERS, *Guide pour l'organisation, le recrutement et la formation du personnel d'exploitation des tunnels routiers, référence 2007R04, AIPCR, Paris, 2007.*
- [18] CETU, *Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers. Fascicule 5. Le Plan d'Intervention et de Sécurité (PIS) . ISRN EQ-CETU-06-1-FR, CETU, Bron, France, 2006. (en français et en anglais)*
- [19] COMITE TECHNIQUE AIPCR DES TUNNELS ROUTIERS, *Rapport n° 5 – Tunnels routiers, XVIIIe Congrès mondial de la Route, Bruxelles, 1987*



- [16] PIARC TECHNICAL COMMITTEE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS *Traffic Incident Management System used in Road Tunnels, reference 05.15.B, PIARC, Paris, 2003.*
- [17] PIARC TECHNICAL COMMITTEE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS *Guide for Organizing, Recruiting and Training Road Tunnel Operating Staff, reference 2007R04, PIARC, Paris, 2007.*
- [18] CETU, *Guide to Road Tunnel Safety Documentation. Booklet 5 : Emergency Response Plans). ISRN EQ-CETU-06-1-FR, CETU, Bron, France, 2006. (English and French)*
- [19] PIARC TECHNICAL COMMITTEE ON ROAD TUNNELS, *Report No 5 - Road Tunnels, XVIIIth World Road Congress, Brussels, 1987.*

GLOSSAIRE

Les termes sont définis ci-dessous pour donner au lecteur une meilleure compréhension du présent rapport technique et en améliorer la clarté.

FRANÇAIS	
Terme	Définition
Activation	Le fait que le tunnel est mis sur le mode de gestion « incendie ».
Activation automatique	L'opérateur du tunnel n'a aucun rôle à jouer dans l'activation. C'est manifestement la seule option pour les tunnels sans personnel.
Commande automatique	L'opérateur du tunnel choisit les valeurs cibles des paramètres commandés (en fonction par exemple de l'emplacement de l'incendie ou des conditions de la circulation) et la valeur est transmise à un algorithme de commande en boucle fermée.
Commande en boucle fermée ou Commande à rétroaction	La commande (telle que définie ci-après) est réalisée à l'aide d'un algorithme qui est alimenté par des mesures en ligne en temps réel et modifie les régimes de ventilation en conséquence. Une telle commande en boucle fermée exige de choisir la valeur cible du paramètre commandé.
Commande	Sans autre précision, le terme « commande » désigne la capacité à atteindre un objectif donné (niveau de pollution, vitesse de l'air), sans indiquer de quelle manière cet objectif est atteint.
Paramètre commandé	Le paramètre sur lequel la valeur cible est donnée, dans la définition de la notion de commande ci-dessus.
Gaine d'extraction	Dans le contexte de la ventilation, l'extraction de la fumée ou de l'air vicié du tunnel se fait par une « gaine d'extraction » ou à la tête du tunnel
Extraction	Le fait d'extraire de l'air du tunnel
Ventilation longitudinale	Principe de ventilation consistant à créer un courant d'air longitudinal dans le tunnel, soit pour diluer les polluants, soit pour pousser la fumée en direction d'une tête.
Activation manuelle	L'opérateur du tunnel est chargé de l'activation, à l'aide des données qu'il reçoit de diverses sources d'information.
Commande manuelle	L'opérateur du tunnel choisit les valeurs des régimes de ventilation à mettre en œuvre, dans le cadre d'une commande en boucle ouverte
Ventilation naturelle	Le courant d'air peut se produire en raison de forces naturelles telles que les différences de pression entre les têtes, la pente du tunnel et les différences de températures géothermiques entre la structure du tunnel et l'air ambiant

GLOSSARY

The terms are defined below to provide the reader with a better and clearer understanding of this technical report

ENGLISH	
Term	Definition
Activation	The fact that the tunnel is set to the “fire” mode of management.
Automatic activation	The tunnel operator has no role to play in the activation. It is obviously the only option for un-manned tunnels.
Automatic control	
	The tunnel operator chooses the target values of the control parameters (as function for example of fire location or traffic conditions) and the value is given to a closed-loop control algorithm.
Closed-loop control or feedback control	The control (as defined in Control below) is made using an algorithm which is fed from real-time on-line measurements and modifies the ventilation regimes appropriately. Such a closed-loop control requires the choice of target value of the controlled parameter.
Control	With no further precision, control means the ability to reach a given target (pollution level, air velocity), with no indication of how it is reached.
Controlled parameter	The parameter on which the target is given, in the above definition of control.
Exhaust	The context used in relation to ventilation pertains to the removal of smoke or polluted air from the tunnel, through an “exhaust duct” or at the tunnel portal.
Extraction	The removal of air from the tunnel
Longitudinal ventilation	A ventilation principle consisting in creating a longitudinal air flow in the tunnel, either to dilute pollutants or push smoke towards a portal.
Manual activation	The tunnel operator is in charge of the activation, using the data he receives from various sources of information.
Manual control	The tunnel operator in charge chooses the values of the ventilation regimes to be set, in the context an open-loop control.
Natural Ventilation	Airflow can occur due to natural forces such as pressure differences between portals, slope of the tunnel and geothermal temperature differences between tunnel structure and ambient air temperature



Exploitation en ventilation naturelle	Pour tout tunnel équipé ou non de systèmes de ventilation mécaniques, le choix peut être fait d'ajuster le système afin de tirer parti des forces naturelles pour mettre en œuvre un régime de ventilation requis pour certaines conditions données. Par exemple, un tunnel unidirectionnel peut être ventilé le plus souvent sans ventilateur.
Systèmes à ventilation naturelle	Lorsqu'il est démontré que la ventilation mécanique ne sera jamais nécessaire, le concepteur peut choisir de recourir à la ventilation naturelle
Commande en boucle ouverte	La commande (telle que définie ci-dessus sous « commande ») est réalisée à l'aide de scénarios prédéfinis, choisis dans une liste en fonction par exemple de l'emplacement de l'incendie et de la situation du trafic.
SCADA	Système de commande et d'acquisition de données de surveillance
Activation semi-automatique	L'opérateur du tunnel est aidé dans l'activation par un système informatique, mais peut quand même avoir besoin de fournir certaines informations, ou bien peut accélérer l'activation en la faisant manuellement. L'opérateur peut également refuser l'activation.
Commande semi-automatique	L'opérateur du tunnel choisit un scénario en fonction du trafic, de l'emplacement de l'incendie, etc., et un système informatisé fixe les valeurs des régimes de ventilation à mettre en œuvre, dans le cadre d'une commande en boucle ouverte.
Ventilation semi-transversale	Principe de ventilation permettant soit d'apporter de l'air frais dans le tunnel, soit d'en extraire de l'air vicié uniformément sur la longueur de la gaine de ventilation
Stratification	Situation où les produits de combustion chauds forment une couche de gaz, généralement chargés de fumée, au-dessus d'une couche d'air plus froid et limpide
Ventilation transversale	Principe de ventilation dans lequel à la fois un apport d'air frais et une extraction d'air vicié, de fumée et de gaz chauds se font dans la même section transversale

Natural ventilation operation	For any tunnel equipped or not with mechanical ventilation systems, the choice may be made to adjust the system to take advantage of natural forces to promote a required ventilation regime for some given conditions. For example, a unidirectional tunnel may be ventilated without fans most of the time
Natural ventilation systems	When it is shown that mechanical ventilation will never be necessary, the designer may opt to rely on natural ventilation
Open-loop control	The control (as defined in "Control" above) is made by using predefined scenarios, chosen from a list depending on, e.g. the position of the fire and traffic situation.
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition system
Semi-automatic activation	The tunnel operator is helped in the activation by a computer system, but still may need to provide some information or may accelerate the activation by doing it manually. The operator may also refuse the activation.
Semi-automatic control	The tunnel operator chooses a scenario as a function of traffic, fire location, etc., and a computer-based sets the values of ventilation regimes to be set, in the context of an open-loop control.
Semi-transverse ventilation	A ventilation system capable of either supplying fresh air into the tunnel or extracting vitiated air uniformly over the length of the air duct.
Stratification	The situation formed when hot combustion products form a layer of generally smoke-laden gases above a clear layer of cooler air.
Transverse ventilation	A ventilation principle in which both supply of fresh air and extraction of vitiated air, smoke and hot gases are occurring in the same section of the tunnel.



ANNEXE A - PRATIQUES ADOPTÉES DANS DIFFÉRENTS PAYS

▶ A.1 - GÉNÉRALITÉS

Plusieurs recommandations nationales, voir *tableau B1, page 96*, donnent des conseils sur l'exploitation des systèmes de ventilation en cas d'incident. Le présent chapitre résume et met en lumière les stratégies décrites dans les textes provenant respectivement d'Autriche (RVS 09.03.31) [3], d'Allemagne (RABT) [4], de France (Instruction technique annexée à la circulaire 2000-63) [6] et de Suisse (OFROU) [5]. Toutes reposent sur la distinction inhérente entre la phase d'auto-évacuation et la phase de lutte contre l'incendie. Alors que la première phase est axée sur l'amélioration des possibilités d'auto-sauvetage, la seconde vise à améliorer les conditions de lutte contre l'incendie. Bien qu'une interaction manuelle doive être possible à chaque étape de la procédure d'incident, au cours de la première phase la ventilation doit être exploitée d'une façon plus ou moins totalement automatique, alors que dans la seconde des conseils donnés par le personnel de secours peuvent entraîner des procédures d'exploitation différentes.

Les éléments clés pour la stratégie opérationnelle à appliquer en cas d'incident sont :

- L'emplacement de l'incendie
- La situation du trafic
- La direction et la vitesse du courant d'air au lieu de l'incident

Il convient de relever que les valeurs cibles pour la vitesse du courant d'air dans le tunnel indiquées dans les paragraphes ci-après se rapportent toujours aux critères de conception figurant dans les recommandations correspondantes.

▶ A.2 – VENTILATION LONGITUDINALE

A.2.1 Trafic bidirectionnel

Dans les tunnels à ventilation longitudinale et trafic bidirectionnel, il existe une forte probabilité que des personnes soient affectées par les fumées. Afin d'améliorer les possibilités d'auto-sauvetage, il est recommandé que la vitesse de propagation des fumées soit faible.

L'Autriche [3] exige une vitesse de courant d'air longitudinale de 1,0 à 1,5 m/s dans la même direction que le courant d'air observé juste avant l'incident. Une inversion du courant d'air est autorisée dans les cas où le risque pour les usagers du tunnel peut être réduit au minimum (principalement dans les régions des têtes).

APPENDIX A - PRACTICES ADOPTED IN SEVERAL COUNTRIES

▶ A.1. GENERAL

Several national guidelines, *see Table B1, page 97*, give advice on the operation of ventilation systems in incident cases. This section summarizes and highlights the strategies described in respective guidelines from Austria (RVS 09.03.31) [3], Germany (RABT) [4], France (Technical instruction in annex to Circular 2000-63) [6] and Switzerland (FEDRO) [5]. Inherent in all of them is that there is a distinction between the self evacuation phase and the fire fighting phase. While the first phase is driven by improving possibilities for self rescue, the latter is aimed at supporting the conditions for fighting the fire. Although a manual interaction should be possible at every stage of the incident procedure, during the first phase the ventilation should run on a more or less fully automatic basis while during the second phase advice from rescue personnel could result in different operation procedures.

Key elements for the operation strategy to be applied in incident cases are:

- Location of the fire
- Traffic situation
- Direction and speed of the airflow at the location to the incident

It should be noted that the target values for the velocity of the airflow in the tunnel given in the following sections are always related to the design criteria given in the respective guidelines.

▶ A.2. LONGITUDINAL VENTILATION

A.2.1. Bidirectional Traffic

In longitudinally ventilated tunnels with bidirectional traffic there is a high probability that people are affected by the smoke. In order to improve the self rescue possibilities the propagation velocity of smoke should be low.

Austria [3] requires a longitudinal airflow velocity of 1.0 to 1.5 m/s in the same direction as the airflow which was observed just before the incident. A reversal of the air flow is allowed in cases when the risk for the tunnel user can be minimized (mainly in portal regions).



En France [6], les exigences sont les suivantes :

- Première phase pendant l'auto-évacuation : limiter la vitesse de l'air afin de préserver la stratification de la fumée
- Deuxième phase après l'auto-évacuation : ajuster la vitesse longitudinale en fonction des besoins de la lutte contre l'incendie (par exemple 3 m/s pour permettre l'approche du foyer d'un côté par les pompiers).

L'Allemagne [4] exige de maintenir une vitesse inférieure à 1,5 m/s durant la phase d'auto-sauvetage. Le même conseil est donné dans la réglementation suisse. Selon la RABT allemande [4], la conception du système de ventilation doit permettre d'atteindre la vitesse critique pour éviter le retour de fumée au cours de la phase de lutte contre l'incendie.

L'Autriche [3], la France [6] et l'Allemagne [4] restreignent l'utilisation des ventilateurs à proximité de l'emplacement de l'incendie (un facteur qui doit être pris en considération dans la phase de conception). En outre, l'Autriche [3] conseille que les ventilateurs situés du côté amont de l'incendie soient utilisés prioritairement par rapport à ceux situés en aval.

A2.2 Trafic unidirectionnel sans congestion

Lorsqu'un incident survient dans un trafic non congestionné, les véhicules situés entre l'incident et la tête de sortie peuvent quitter le tunnel en sécurité. L'Allemagne [4] exige une vitesse minimale du courant d'air supérieure à la vitesse critique. La Suisse [5] exige au minimum 3 m/s et l'Autriche [3] le maintien de 2 m/s. L'Autriche conseille de plutôt utiliser les ventilateurs entre la tête de sortie et l'incident. La France [6] exige un minimum de 3 m/s, et 4 m/s s'il y a des marchandises dangereuses.

A2.3 Trafic unidirectionnel avec congestion

Lorsqu'un incident survient dans un trafic congestionné, les véhicules situés entre l'incident et la tête de sortie ne peuvent pas quitter le tunnel. La même stratégie de ventilation doit être appliquée que dans le cas du trafic bidirectionnel.

En France, des extractions massives localisées sont obligatoires tous les 500 m. En l'absence de ces dispositifs, la ventilation doit être mise en œuvre en deux phases : dans une première phase, la vitesse du courant d'air doit être de 1 à 2 m/s pour permettre l'auto-évacuation ; dans une seconde phase, elle doit pouvoir atteindre 3 m/s si les pompiers le demandent.

French requirements [6] are as follows:

- first stage during self-evacuation: limit air flow velocity in order to keep the smoke stratification,
- second stage after self-evacuation: adjust longitudinal velocity according to the needs of fire-fighting (for example 3.0 m/s to allow firemen to reach the fire on one side).

Germany [4] requires a velocity lower than 1.5 m/s to be maintained during the self rescue phase. The same advice is given in the Swiss regulation [2]. According to the German RABT [4] the design of the ventilation system must provide the capability of achieving the critical velocity to avoid smoke backlayering during the fire fighting phase.

Austria [3], France [6] and Germany [4] restrict the usage of fans close to the fire location (a factor that must be considered in the design phase). In addition Austria [3] advises that the fans at the upstream side of the fire location are given a higher priority in operation compared to those downstream of the incident.

A.2.2. Unidirectional Traffic Without Congestion

When an incident occurs in non-congested traffic the vehicles between the incident and exit portal can leave the tunnel safely. Germany [4] requires a minimum velocity of the air flow exceeding the critical velocity. Switzerland [5] require a minimum of 3 m/s and Austria [3] 2 m/s to be maintained. Austria gives advice to favour the operation of the fans between the exit portal and the incident. France [6] requires a minimum of 3 m/s, and 4 m/s in case of hazardous goods.

A.2.3. Unidirectional Traffic With Congestion

When an incident occurs in congested traffic vehicles between incident and exit portal cannot leave the tunnel. The same ventilation strategy has to be applied as in the case of bidirectional traffic.

In France localised massive smoke exhaust with a spacing of 500 m is compulsory. If such devices are not installed, ventilation should be operated in two stages : in a first stage airflow velocity should be from 1 to 2 m/s to make self-evacuation possible, in a second stage it should be able to reach 3 m/s if required by fire-fighters.



► A3 - VENTILATION SEMI-TRANSVERSALE

La procédure d'exploitation en cas d'incident est la même que pour les systèmes transversaux.

En Autriche et en Suisse, les systèmes semi-transversaux ne sont autorisés que pour l'extraction de l'air et avec des trappes télécommandées. Les systèmes semi-transversaux seulement pour l'air frais ne sont plus autorisés pour les nouveaux tunnels.

► A4 - VENTILATION TRANSVERSALE AVEC TRAPPES DE DÉSENFUMAGE TÉLÉCOMMANDÉES

Les systèmes de ventilation transversaux (et semi-transversaux) avec trappes de désenfumage télécommandées ont l'avantage d'extraire les fumées à proximité de l'emplacement de l'incendie. L'efficacité du désenfumage dépend des paramètres suivants :

Capacité d'extraction du système de ventilation

L'Autriche [3] exige une capacité d'extraction minimale de 120 m³/s (à 20°C) à chaque emplacement de la gaine d'air vicié sur une longueur de 150 m. L'Allemagne [4] demande un volume d'extraction allant jusqu'à 200 m³/s à 300°C en fonction de la catégorie du tunnel. En Suisse [5], le débit d'extraction minimal en m³/s à travers les trappes de désenfumage ouvertes est calculé en supposant une vitesse de 4 m/s à travers la section du tunnel (en d'autres termes, pour une section de 50 m², un débit d'extraction de 200 m³/s à 20°C est requis sur une longueur de 200 m) ; pour les tunnels unidirectionnels à faible trafic, un facteur de 3,3 m/s peut être appliqué. Lorsque le courant d'air longitudinal est contrôlé, la France spécifie un débit minimal d'extraction de 110 m³/s sur une longueur de 400 m pour les tunnels urbains et 600 m pour les tunnels non urbains. Si le courant d'air longitudinal n'est pas contrôlé, le débit doit être d'au moins 80 m³/s auxquels on ajoute 1,5 fois la section transversale du tunnel.

Dimensions des trappes ouvertes

L'efficacité de l'extraction de fumée est la plus élevée lorsque la section totale des trappes de désenfumage ouvertes est égale à la section de la gaine d'extraction. La vitesse de dimensionnement pour les trappes de désenfumage va de 15 m/s à 20 m/s. La distance entre les trappes de désenfumage est de 50 à 100 m. En cas d'incident, une à trois trappes de désenfumage sont ouvertes. En France, la distance maximale est de 50 m pour les tunnels urbains et de 100 m pour les tunnels non urbains. L'extraction est répartie sur 400 m (tunnel urbain) ou 600 m (tunnel non urbain).

► A.3. SEMI-TRANSVERSE SYSTEMS

The operation procedure in incident mode is the same as for transverse systems.

In Austria and Switzerland semi-transverse systems are allowed only for exhaust air and in combination with controllable dampers. Fresh air semi-transverse systems are no longer permitted for new tunnels.

► A.4. TRANSVERSE VENTILATION WITH CONTROLLABLE DAMPERS

Transverse (and semi-transverse) ventilation systems with controllable dampers have the advantage of extracting smoke close to the fire location. The efficiency of the smoke extraction is dependent on the following parameters:

Extraction capacity of the ventilation system

Austria [3] requires a minimum extraction capacity of 120 m³/s (at 20°C) at each location of the exhaust duct over a length of 150 m. Germany [4] asks for an extraction volume of up to 200 m³/s at 300°C depending on the category of the tunnel. In Switzerland [5] the minimum extraction rate in m³/s through the open dampers is calculated assuming a velocity of 4 m/s across the tunnel section (i.e. for a cross section of 50 m², an extraction volume flow of 200 m³/s at 20°C is required over a length of 200 m); for unidirectional tunnels with low traffic a factor of 3.3 m/s can be applied. France specifies, when the longitudinal airflow is controlled, a minimum extraction flow of 110 m³/s over a length of 400 m for urban tunnels and 600 m for non-urban tunnels. If the longitudinal airflow is not controlled, the extraction rate must be at least 80 m³/s + 1.5 x tunnel cross section.

Size of the open damper(s)

The efficiency of smoke extraction is highest when the total cross section of the open dampers is equal to the cross section of the exhaust air duct. The design velocity of the dampers ranges from 15 m/s to 20 m/s. The spacing between the dampers lies between 50 to 100 m. In case of an incident 1 to 3 dampers are opened. In France, the maximum spacing is 50 m for urban tunnel and 100 m for non-urban tunnels. Smoke extraction is shared out on 400 m (urban tunnel) or 600 m (non-urban tunnel).



Obtention d'une vitesse longitudinale minimale dans le tunnel directement au-dessous des trappes de désenfumage ouvertes (point zéro)

Les fumées doivent être transportées jusqu'aux trappes ouvertes en jouant sur les débits de ventilation transversale des cantons de ventilation s'il en existe plusieurs. Parfois, il peut être nécessaire d'ajouter des accélérateurs. Dans les tunnels à trafic bidirectionnel, le but est de créer un courant d'air symétrique venant des deux côtés en direction des trappes ouvertes. Dans les tunnels à trafic unidirectionnel où un incident se produit en situation de congestion, la philosophie appliquée est la même. Dans les tunnels non congestionnés, l'Allemagne [4] et la Suisse [5] exigent une vitesse longitudinale de 3 m/s (Suisse) ou la vitesse critique pour éviter le retour de fumée (Allemagne) dans la direction principale. L'Autriche [3] fractionne le volume d'extraction, en recommandant que les 2/3 du volume soient extraits de la direction principale, et 1/3 de l'autre côté.

ANNEXE B - RECOMMANDATIONS SUR LES TUNNELS ROUTIERS DANS LE MONDE

Le *tableau B.1* donne une liste de quelques unes des recommandations actuellement utilisées pour les tunnels routiers dans le monde. Nombre de ces documents servent de base aux décisions de planification et de conception dans les pays concernés.

TABLEAU B.1.
RECOMMANDATIONS SUR LES TUNNELS ROUTIERS DANS LE MONDE

PAYS INDIVIDUELS	
Allemagne	Forschungsgesellschaft für Strassen- and Verkehrswesen, Richtlinien fuer Ausstattung und Betrieb von Strassentunneln (RABT), Germany, 2006
Australie	Road tunnel design guideline, Fire Safety Design, Part 1 – 3, Roads and Traffic Authority (RTA), Australia, 2007
Autriche	Forschungsgesellschaft für das Verkher und Strassenwesen, RVS 9261:9262, Austria, 1997
Croatie	Regulations on technical Standards and Conditions for Design and Construction of Tunnels on Roads, Croatia, 1991
République tchèque	Design of road tunnels, Standard ČSN 73 7507 Road tunnel equipment - technical specifications - Guideline TP 98
Etats Unis	Road Tunnel Design Guidelines, Federal Highway Administration, FHWA-IF-05-023, 2004

Achieving a minimum longitudinal velocity in the tunnel directly below the open dampers (zero point)

The smoke has to be transported to the open damper(s) by controlled transverse ventilation in case of multiple ventilation sections. Sometimes support of additional jet fans may be necessary. In tunnels with bidirectional traffic the aim is to provide a symmetrical air flow from both sides towards the open damper(s). In tunnels with unidirectional traffic and an incident within a queue the same philosophy is applied. In non congested tunnels Germany [4] and Switzerland [5] require a longitudinal velocity of 3 m/s (Switzerland) or critical velocity to avoid back-layering (Germany) in the main direction. Austria [3] splits the extraction volume; recommending that 2/3 of the volume is extracted from the main flow direction and 1/3 from the other side.

APPENDIX B - WORLDWIDE ROAD TUNNEL GUIDELINES

Table B.1. provides a list of some of the road tunnel guidelines currently in use around the world. Many of these documents are employed as a basis for making planning and design decisions in the specific individual countries.

TABLE B.1.
WORLDWIDE ROAD TUNNEL GUIDELINES

INDIVIDUAL COUNTRIES	
Australia	Road tunnel design guideline, Fire Safety Design, Part 1 – 3, Roads and Traffic Authority (RTA), Australia, 2007
Austria	Forschungsgesellschaft für das Verkher und Strassenwesen, Design guidelines tunnel ventilation, RVS 9261:9262, Austria, 1997
Croatia	Regulations on technical Standards and Conditions for Design and Construction of Tunnels on Roads, Croatia, 1991
Czech Republic	Design of road tunnels, Standard ČSN 73 7507 Road tunnel equipment - technical specifications - Guideline TP 98
France	Technical Instruction annexed to Inter-Ministry Circular No. 2000-63—Safety in the Tunnels of the National Highways Network, 2000
Germany	Forschungsgesellschaft für Strassen- and Verkehrswesen, Richtlinien fuer Ausstattung und Betrieb von Strassentunneln (RABT), Germany, 2006



France	Instruction technique annexée à la circulaire interministérielle n°2000-63 - Sécurité dans les tunnels du réseau routier national, 2000
Japon	National Safety Standard of Emergency Facilities on Road Tunnel, Japan Road Association, Japan, 2001
Norvège	Norwegian Design Guide—Road Tunnels, Public Roads Administration, Norway, 1990
Pays-Bas	Recommendations Ventilation of Road Tunnels, RWS Bouwdienst, Steunpunt Tunnelveiligheid, 2005,
Pays nordiques	Ventilation of Road Tunnels, Sub- Committee 61, Nordisk Vejteknisk Forbund (NVF), Report No. 6, 1993
Royaume Uni	Design Manual for Roads and Bridges, Part 9, BD 78/99, Design of Road Tunnels, 1999
Suède	Tunnel 2004—General Technical Specification for new tunnels and upgrading of old tunnels, Swedish National Road Administration, Publ. 2004,124, Sweden 2004
Suisse	Ventilation des tunnels routiers, Office Fédéral des Routes (OFROU), 2004
ORGANISATIONS INTERNATIONALES	
NFPA	NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2008
AIPCR	Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers, Association mondiale de la route (AIPCR), Paris, 1999
Union Européenne	Directive 2004/54/CE du Parlement européen et du Conseil concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier transeuropéen, 29 avril 2004
ONU	Conseil économique, Commission économique pour l'Europe, Comité des transports intérieurs, Recommandations du groupe d'experts sur la sécurité dans les tunnels routiers, 10 décembre 2001

Japan	National Safety Standard of Emergency Facilities on Road Tunnel, Japan Road Association, Japan, 2001
Netherlands	Recommendations Ventilation of Road Tunnels, RWS Bouwdienst, Steunpunt Tunnelveiligheid, 2005,
Norway	Norwegian Design Guide—Road Tunnels, Public Roads Administration, Norway, 1990
Nordic Countries	Ventilation of Road Tunnels, Sub- Committee 61, Nordisk Vejteknisk Forbund (NVF), Report No. 6, 1993
Sweden	Tunnel 2004—General Technical Specification for new tunnels and upgrading of old tunnels, Swedish National Road Administration, Publ. 2004,124, Sweden 2004
Switzerland	Ventilation for Road Tunnels, Swiss Federal Roads Authority (FEDRO), 2004
United Kingdom	Design Manual for Roads and Bridges, Part 9, BD 78/99, Design of Road Tunnels, 1999
United States	Road Tunnel Design Guidelines, Federal Highway Administration, FHWA-IF-05-023, 2004
INTERNATIONAL ORGANIZATIONS	
NFPA	NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2008
PIARC	Fire and Smoke Control in Road Tunnels, World Road Association (PIARC), Paris, 1999 Systems and Equipment for Fire and Smoke Control, PIARC, 2007
European Union	Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network, 29 April 2004
United Nations	Economic Council, Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee, Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels, 10 December 2001