



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral des routes OFROU
Division réseaux routiers N

Directive

Ventilation des tunnels routiers

choix du système, dimensionnement et équipement

Édition 2004 - V1.2

*Avec adjonction de l'annexe VII :
précisions du 31 juillet 2006*

Directive

Ventilation des tunnels routiers

choix du système, dimensionnement et équipement

Édition 2004 - V1.2

Impressum

Auteur(s) / Groupe de travail

Jeanneret A.	(OFROU, président)
Hofer A.	(OFROU président suppléant)
Allemann M.	(OFROU)
Fruttschi F.	(canton de Vaud)
Sarrasin H.	(canton du Valais)
Scheidegger H.-R.	(bureau d'ingénieurs)
Schneider P.	(canton de Neuchâtel)
Stähli A.	(bureau d'ingénieurs)
Steinemann U.	(bureau d'ingénieurs)
Zumsteg F.	(bureau d'ingénieurs, rédaction)

Éditeur

Office fédéral des routes OFROU
Division réseaux routiers N, 3003 Berne

Lieu, année

Berne, 2004

Diffusion

La directive est téléchargeable gratuitement sur le site www.astra.admin.ch.
F235-0528

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	1	11 Conditions d'exploitation	30
1 Introduction	3	11.1 Qualité de l'air dans l'espace de circulation.....	30
1.1 Objectif de la directive.....	3	11.2 Pilotage.....	30
1.2 Champ d'application.....	3	11.3 Traçabilité de sinistres particuliers	31
1.3 Entrée en vigueur	3	11.4 Gestion du trafic	31
2 Fonctions de la ventilation	4	11.5 Alimentation sans coupure (<i>UPS</i>)	31
2.1 Objectifs de protection.....	4	12 Travaux de maintenance et d'entretien....	32
2.2 Ventilation en cas de trafic normal	4	12.1 Qualité de l'air dans l'espace de circulation.....	32
2.3 Ventilation en cas de sinistre	4	12.2 Étendue des travaux.....	32
2.4 Réduction des atteintes à l'environnement	4	ANNEXES.....	33
3 Description des systèmes de ventilation	5	I Abréviations, unités et glossaire	35
3.1 Groupes principaux de systèmes de ventilation	5	I.1 Abréviations.....	35
3.2 Système de ventilation naturelle	5	I.2 Unités.....	36
3.3 Systèmes de ventilation mécanique sans aspiration en cas de sinistre.....	5	I.3 Glossaire.....	36
3.4 Systèmes de ventilation mécanique avec aspiration en cas de sinistre.....	6	II Valeurs indicatives destinées aux prévisions de trafic.....	38
3.5 Systèmes de ventilation combinés.....	7	II.1 Évolution du trafic.....	38
4 Application de la directive.....	8	II.2 Trafic horaire déterminant	38
5 Données de base nécessaires	9	II.3 Fréquence des embouteillages	38
5.1 Données concernant les tunnels.....	9	III Calcul des émissions	39
5.2 Données concernant le trafic	9	III.1 Bases.....	39
5.3 Autres données	9	III.2 Émissions des voitures de tourisme.....	39
6 Choix du système de ventilation	10	III.3 Émissions des poids lourds.....	42
6.1 Démarche.....	10	III.4 Évolution des émissions de base en fonction du temps	45
6.2 Principaux genres de trafic.....	10	IV Ventilateurs de jet.....	46
6.3 Détermination du groupe principal de système de ventilation.....	11	IV.1 Généralités	46
6.4 Détermination du système de ventilation	13	IV.2 Caractéristiques des ventilateurs	46
7 Dimensionnement	14	IV.3 Disposition	46
7.1 Dimensionnement pour l'exploitation normale	14	IV.4 Exploitation normale	46
7.2 Dimensionnement pour l'exploitation en cas de sinistre	19	IV.5 Exploitation en cas de sinistre	47
7.3 Diminution des nuisances additionnelles à proximité des portails	24	V Remarques relatives aux composants (liste de contrôle).....	48
7.4 Optimisation de l'installation.....	25	VI Données servant à optimiser le dimensionnement.....	50
7.5 Ventilation des locaux d'exploitation	25	VI.1 Généralités	50
7.6 Documentation du dimensionnement.....	25	VI.2 Amortissement du capital investi.....	50
8 Équipement.....	26	VI.3 Charges moyennes	50
8.1 Généralités	26	VI.4 Durée d'utilisation ou période considérée	51
8.2 Instruments de mesure et équipement de détection.....	26	VI.5 Intérêt du capital et renchérissement	52
8.3 Résistance à la température	27	VI.6 Prix de l'énergie	52
9 Chemins de fuite	28	VI.7 Données nécessaires	52
9.1 Généralités	28	VII Précisions du 31 juillet 2006.....	53
9.2 Tunnel comportant deux tubes parallèles	28	VII.1 Domaine d'application	53
9.3 Tunnels à un tube.....	28	VII.2 Précisions	54
10 Vérifications particulières	29	VII.3 Nomogramme pour l'estimation des pertes de pression	56
10.1 Exigences particulières posées aux composants de l'installation	29	Bibliographie	57
10.2 Mise en service de l'installation.....	29		
10.3 Examen de la conception générale.....	29		

AVANT-PROPOS

Jusqu'à présent, la ventilation des tunnels routiers était conçue et dimensionnée sur la base de la directive "*Principes de la ventilation des tunnels routiers*" de mai 1983, établie sur mandat de l'OFROU.

Ces dernières années, les conditions ont beaucoup changé dans la lutte contre la pollution de l'air. L'instauration de nouvelles normes a généré une diminution drastique des émissions polluantes. Ce fait, associé au très haut potentiel de dangerosité que revêtent les incendies de véhicules à l'intérieur de tunnels, a eu pour conséquence de déplacer les priorités du dimensionnement des ventilations : le maintien de la qualité de l'air à l'intérieur des tunnels et à leurs alentours, a cédé le pas à la préservation de possibilités de fuite sûres pour leurs usagers en cas d'accident.

L'élaboration de la directive "*Ventilation des tunnels routiers -choix du système, dimensionnement et équipement*" a commencé en 1999. Différentes ébauches de cette directive sont utilisées depuis le milieu de l'année 2000, pour la conception et le dimensionnement des nouvelles installations de ventilation de tunnel, ainsi que pour l'assainissement des équipements existants. L'application pratique de la directive durant plusieurs années a permis de l'enrichir avec des expériences concrètes. D'autre part, dans le cadre des instances internationales de l'ONU, l'UE, l'AIPCR (Association mondiale de la route) et de la Task Force "Tunnels", les échanges intensifs avec les spécialistes internationaux ont conduit à une harmonisation des exigences, pour les installations de ventilation des tunnels des pays limitrophes.

Office fédéral des routes

Dr Rudolf Dieterle

Directeur

1 INTRODUCTION

1.1 Objectif de la directive

La présente directive porte sur la ventilation des tunnels creusés et des tranchées couvertes du réseau routier. La ventilation des tunnels comprend l'ensemble des équipements nécessaires pour maintenir un air de qualité suffisante à l'intérieur des tunnels, aussi bien en exploitation normale que dans des situations exceptionnelles telles que des perturbations du flux de trafic ou des accidents. Le système de ventilation d'un tunnel englobe notamment l'espace de circulation, les gaines et les centrales de ventilation, les ventilateurs, ainsi que les équipements de mesure et de commande.

Cette directive décrit les systèmes de ventilation usuels au moment de la publication. Elle fixe les principes et les critères à observer dans le choix d'un système, dans le dimensionnement et dans l'exploitation des installations de ventilation des tunnels routiers. Elle sert, d'une part, à simplifier les projets de ventilation de tunnels et, d'autre part, à uniformiser les systèmes et les installations.

La présente directive s'adresse en premier lieu :

- aux maîtres d'ouvrages, qui y trouveront l'instrument leur permettant de procéder eux-mêmes à une première évaluation de projets courants ;
- aux ingénieurs spécialistes de la ventilation, qui disposeront de valeurs de base uniformes et précises pour choisir le système et le dimensionner ;
- aux ingénieurs d'autres disciplines, qui bénéficieront ainsi, dès les premières phases du projet, des données nécessaires pour assurer la coordination entre les différentes spécialités ;
- aux exploitants de tunnels, pour qui elle précise les exigences fondamentales relatives à la mise en service, à l'exploitation et à l'entretien de l'installation de ventilation.

1.2 Champ d'application

La directive s'applique à la planification du projet, au choix du système, au dimensionnement et à l'exploitation de la ventilation des tunnels routiers. Elle énumère aussi les exigences relatives à l'exploitation et à l'entretien d'installations de ventilations de tunnels. Elle a un caractère contraignant pour tous les tunnels routiers bénéficiant d'une participation financière de la Confédération. Dans la mesure du possible, elle sera également appliquée aux autres tunnels routiers suisses.

La présente directive définit un standard qui est également applicable lors de l'assainissement de tunnels existants.

Des écarts par rapport aux dispositions de la présente directive sont admis à condition d'être suffisamment justifiés par les spécificités d'un projet.

1.3 Entrée en vigueur

La présente directive "*Ventilation des tunnels routiers*" entre en vigueur le 22 décembre 2004. Elle annule et remplace le rapport "*Principes de la ventilation des tunnels routiers*" [1] de mai 1983, établi sur mandat de l'OFROU.

2 FONCTIONS DE LA VENTILATION

2.1 Objectifs de protection

L'exploitation du système de ventilation d'un tunnel doit remplir les fonctions de base suivantes :

- alimenter suffisamment en air frais l'espace de circulation lorsque le trafic est normal ;
- réduire au minimum l'enfumage de l'espace de circulation et des chemins de fuite par les polluants dégagés en cas de sinistre ;
- éviter une pollution excessive par l'air extrait du tunnel, au voisinage des portails.

2.2 Ventilation en cas de trafic normal

Afin de maintenir une qualité de l'air suffisante, il faut amener de l'air frais dans l'espace de circulation. Pour déterminer les besoins en air frais, on considère, outre le trafic horaire déterminant (THD), la probabilité de survenance de différents cas de figure tels que circulation congestionnée ou embouteillages. Par ailleurs, il y a lieu de tenir compte des impératifs inhérents aux travaux d'entretien et de révision.

2.3 Ventilation en cas de sinistre

En cas d'incendie d'un véhicule dans un tunnel, la ventilation doit :

- faciliter l'auto-sauvetage des usagers en réduisant au maximum l'enfumage des chemins de fuite ;
- maintenir libres de fumée les accès pour les équipes de secours ;
- permettre le désenfumage du tunnel après l'extinction de l'incendie.

Au surplus, lors d'un accident sans incendie de véhicule, la ventilation doit contribuer, dans la mesure du possible :

- à éloigner des usagers du tunnel les substances volatiles toxiques.

2.4 Réduction des atteintes à l'environnement

On prendra en considération les aspects suivants :

- la protection des zones des portails contre les immissions polluantes excessives en provenance du tunnel ;
- la protection des zones des portails et des cheminées contre des nuisances sonores excessives dues aux installations de ventilation ;
- une utilisation rationnelle de l'énergie.

3 DESCRIPTION DES SYSTÈMES DE VENTILATION

3.1 Groupes principaux de systèmes de ventilation

Les systèmes de ventilation sont divisés en trois groupes principaux :

- 1) système de ventilation naturelle ;
- 2) systèmes de ventilation mécanique sans aspiration en cas de sinistre ;
- 3) systèmes de ventilation mécanique avec aspiration en cas de sinistre.

3.2 Système de ventilation naturelle

Ce système ne comporte pas de composant mécanique de ventilation.

Exploitation normale

Dans le cas de la ventilation naturelle, un courant d'air longitudinal parcourt le tube du tunnel en raison :

- de la pression exercée par le trafic ;
- de la pression résultant des différences de température ;
- des différences de pressions météorologiques entre les portails (vent et pression barométrique).

L'échange d'air se fait exclusivement par les portails du tunnel.

Exploitation en cas de sinistre

Lorsqu'un sinistre survient à l'intérieur d'un tunnel, les gaz dégagés s'échappent par l'un des portails ou par les deux. Dans un tunnel en pente, ces effluents se propagent généralement dans la direction du portail supérieur.

3.3 Systèmes de ventilation mécanique sans aspiration en cas de sinistre

3.3.1 Généralités

Le groupe principal des systèmes de ventilation sans aspiration en cas de sinistre comprend les ventilations mécaniques de tunnels ou de secteurs de tunnels, exclusivement ventilés longitudinalement dans l'espace de circulation.

3.3.2 Système de ventilation longitudinale par ventilateurs de jet

L'air est poussé longitudinalement à travers le tunnel à l'aide de ventilateurs de jet. Les ventilateurs sont généralement placés au-dessus de l'espace de circulation.

Exploitation normale

Dans les tunnels unidirectionnels, la direction de l'écoulement est généralement donnée par la direction du déplacement des véhicules.

Dans les tunnels bidirectionnels, il y a lieu de faire en sorte que les ventilateurs de jet soient exploités de manière à amplifier les forces résultant naturellement de l'effet du trafic, des écarts de température et des différences de pression barométrique entre les portails.

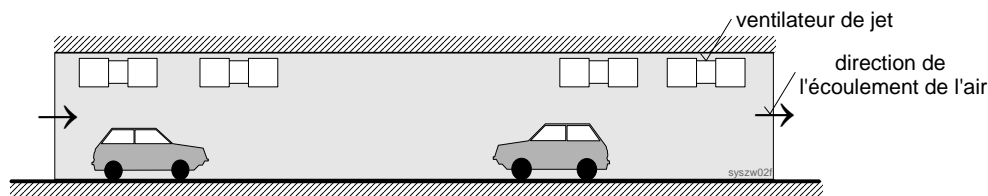


Fig. 1 : ventilation longitudinale par des ventilateurs de jet.
Applicable en trafic bidirectionnel ou unidirectionnel.

L'extraction éventuelle de l'air vicié avant le portail de sortie permet de diminuer le surplus de charge polluante au voisinage du portail de sortie des tunnels unidirectionnels (ventilation destinée à prévenir les immissions). Dans ce cas particulier, l'écoulement longitudinal à travers le tunnel est également produit par l'effet de piston exercé par les véhicules ou, en cas de trafic congestionné ou d'embouteillage, par des ventilateurs de jet. (Pour le cas des tunnels bidirectionnels, voir §3.4.2).

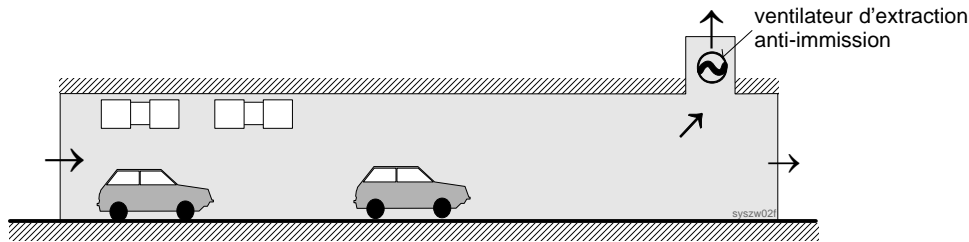


Fig. 2 : ventilation longitudinale avec ventilateurs de jet et ventilateur d'extraction anti-immissions.
En vue de diminuer la charge polluante au voisinage du portail de sortie des tunnels unidirectionnels.

Exploitation en cas de sinistre

En cas de sinistre, les gaz libérés se propagent dans l'axe du tunnel. La direction et la vitesse de leur propagation dans l'espace de circulation sont influencées par les ventilateurs de jet.

3.4 Systèmes de ventilation mécanique avec aspiration en cas de sinistre

3.4.1 Généralités

En cas de sinistre, l'aspiration concentrée se fait généralement au moyen de ventilateurs centraux et à travers une gaine d'aspiration. Celle-ci est généralement aménagée au-dessus d'une dalle intermédiaire dans laquelle sont disposés des clapets de ventilation télécommandés.

Dans ces systèmes, des ventilateurs de jet sont nécessaires pour diriger l'écoulement de l'air dans l'espace de circulation.

3.4.2 Ventilation avec aspiration sans apport d'air frais

Exploitation normale

Lorsque le dispositif d'aspiration de l'air vicié n'est pas en fonction, le système de ventilation correspond à une ventilation longitudinale telle que décrite au §3.3.2.

Avec l'aspiration ponctuelle, un tunnel peut être divisé en deux segments dotés de ventilations longitudinales. Dans les tunnels unidirectionnels, l'aspiration ponctuelle avant le portail de sortie peut servir à diminuer les charges polluantes supplémentaires au voisinage du portail de sortie (voir figure 2).

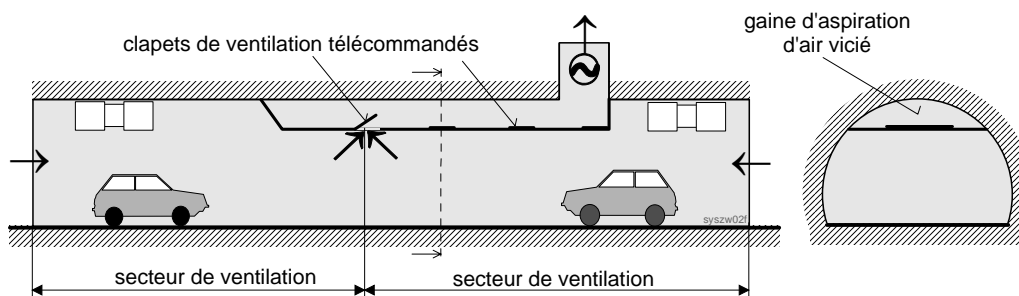


Fig. 3 : ventilation avec aspiration sans apport d'air frais.

Exploitation en cas de sinistre

En cas de sinistre, les effluents gazeux dégagés sont aspirés à l'endroit du sinistre à travers des clapets de ventilation télécommandés. Au besoin, l'écoulement longitudinal dans l'espace de circulation est influencé par une exploitation contrôlée des ventilateurs de jet. Dans la mesure du possible, ces derniers sont disposés à proximité des portails.

3.4.3 Ventilation avec aspiration et apport d'air frais

Lorsqu'un apport d'air frais est nécessaire, celui-ci doit être injecté longitudinalement, sur toute la longueur, au niveau de la chaussée. Cela nécessite une gaine d'amenée d'air frais séparée. Les systèmes de ce genre sont toujours dotés d'une gaine d'aspiration d'air vicié munie de clapets de ventilation télécommandés.

Exploitation normale

Les différents systèmes de ventilation possibles sont :

- ventilation longitudinale naturelle (sans soutien mécanique) ;
- ventilation longitudinale naturelle soutenue par des ventilateurs de jet ;
- aspiration au milieu du tunnel (cf. §3.4.2) ou ventilation semi-transversale ;
- ventilation transversale.

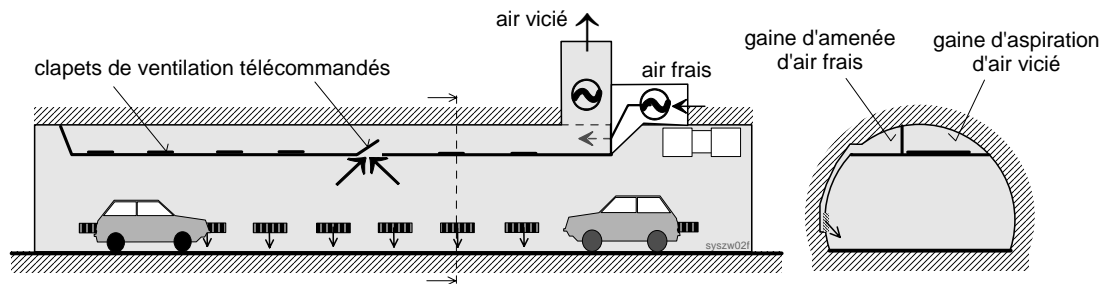


Fig. 4 : ventilation avec aspiration d'air vicié et amenée d'air frais.

La combinaison d'un apport d'air frais sur toute la longueur du tunnel avec un nombre défini de clapets de ventilation totalement ouverts permet la mise en œuvre, par secteurs de longueur variable, d'une ventilation semi-transversale avec apport d'air frais au niveau de la chaussée. S'agissant des très longs tunnels, ce système offre la possibilité de mettre en œuvre une ventilation transversale lorsque les clapets d'aspiration sont partiellement ouverts.

Exploitation en cas de sinistre

En cas de sinistre, les gaz dégagés sont aspirés à travers des clapets de ventilation télécommandés. L'apport d'air frais est stoppé dans le secteur où se produit le sinistre, ou réduit à un débit déterminé en fonction de la capacité d'extraction (§7.2.4). Au besoin, l'écoulement longitudinal dans l'espace de circulation est modulé au moyen de ventilateurs de jet.

Le système de ventilation semi-transversale ou transversale avec inversion de l'air frais vers les ventilateurs d'extraction utilisé autrefois n'est plus admis parce que la capacité d'aspiration doit être disponible très rapidement et parce que l'air frais réparti sur toute la longueur doit toujours être injecté au niveau de la chaussée.

3.5 Systèmes de ventilation combinés

Dans les configurations de tunnels complexes, on peut combiner entre eux plusieurs des systèmes de base décrits plus haut. Cela nécessite la coordination des systèmes de ventilation et de leur exploitation entre les différents secteurs des tunnels. Il faut, en particulier, prendre en compte la charge polluante initiale de l'air lors du passage d'un secteur du tunnel à un autre.

4 APPLICATION DE LA DIRECTIVE

Lors de la conception et de la planification d'un tunnel routier, il est essentiel de prendre très tôt les décisions de principe qui auront des conséquences notables sur la construction, l'entretien et l'exploitation de cet ouvrage et de son installation de ventilation. Il est donc important de coordonner les objectifs des différents domaines tels que construction, sécurité, protection de l'environnement et dispositions architecturales.

La directive de l'OFROU "*Élaboration des projets et construction des ouvrages d'art des routes nationales*" [2] comprend un descriptif des différentes phases de projets.

La planification et l'élaboration d'un projet selon la présente directive s'ordonnent suivant le schéma ci-dessous, le degré d'approfondissement des études étant à adapter à chacune des phases.

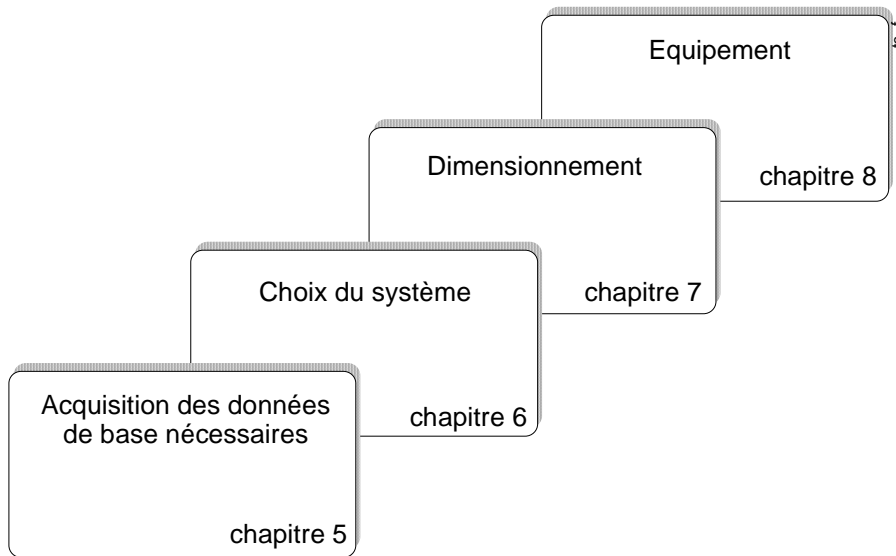


Fig. 5 : étapes de l'application de la directive.

5 DONNÉES DE BASE NÉCESSAIRES

Les données de base décrites ci-après doivent être disponibles tant pour le choix du système de ventilation que pour son dimensionnement. Elles doivent être vérifiées à chaque phase du projet et affinées en conséquence.

5.1 Données concernant les tunnels

- Situation des portails.
- Nombre de tubes.
- Nombre de voies de circulation.
- Longueur de chaque tube.
- Profil type et coupes transversales indiquant les possibilités d'implantation de ventilateurs jet.
- Profil en long avec altitudes.
- Implantation possible de centrales et de cheminées de ventilation.
- Emplacement des issues de secours.
- Indications relatives à une éventuelle réalisation par étapes ou à une extension future.

5.2 Données concernant le trafic

Le choix du système de ventilation selon le processus décrit au chapitre 6 nécessite de connaître au moins les données suivantes concernant le trafic :

- Trafic unidirectionnel ou bidirectionnel ;
- Trafic journalier moyen (TJM) l'année prévue de mise en service et 10 ans plus tard (somme des deux directions) ;
- Part des poids lourds au TJM l'année prévue de mise en service et 10 ans plus tard.

Par ailleurs il est nécessaire, pour le dimensionnement selon le chapitre 7, de connaître les caractéristiques énumérées ci-dessous. Si l'on ne dispose que de prévisions de trafic incomplètes, il est possible, dans les premières phases d'un projet, d'appliquer les valeurs indicatives de l'annexe II.

- Trafic horaire déterminant (THD) l'année prévue de mise en service et 10 ans plus tard.
- Part des poids lourds au THD l'année prévue de mise en service et 10 ans plus tard.
- Poids total moyen des poids lourds.
- Répartition des valeurs ci-dessus pour chaque voie de circulation.
- Vitesses admissibles (pour chaque voie de circulation et catégorie de véhicules).
- Admission de trafic mixte (trafic supplémentaire de véhicules agricoles, motocycles et vélos) ainsi que de piétons.
- Fréquence des embouteillages par tube exprimée en nombre d'heures de bouchons par an pour l'année prévue de mise en service et 10 ans plus tard. On considérera les particularités du tracé dans les zones précédant le tunnel (voies d'entrée et de sortie, intersections, etc.) et les possibilités de gestion du trafic.
- Évaluation de la probabilité d'une future fluctuation sensible des données de base.

Le laps de temps 10 ans après l'année prévue de mise en service signifie que, au moment de la planification, l'horizon des prévisions se situe entre 15 et 25 ans plus tard. Il serait inopportun de considérer un point de repère plus éloigné en raison des incertitudes que revêtent de tels pronostics.

5.3 Autres données

Le choix et le dimensionnement d'un système de ventilation peuvent être influencés par d'autres facteurs et d'autres valeurs prévisionnelles, notamment :

- Données météorologiques en cas d'expositions particulières (température, vent, pression atmosphérique) ;
- Conditions liées à la protection de l'environnement.

6 CHOIX DU SYSTÈME DE VENTILATION

6.1 Démarche

Le choix du groupe principal de système de ventilation s'effectue pour chaque tube et comporte les étapes suivantes :

- 1) Détermination du genre de trafic habituel selon le §6.2 et l'annexe II.3: TU 1, TU 2 ou TB.
- 2) Établissement de la longueur déterminante du tunnel. Elle correspond en général à la distance entre les portails. Dans le cas de systèmes de tunnels ramifiés, la longueur déterminante correspond à la longueur maximale du chemin que peut parcourir la fumée d'un incendie.
- 3) Détermination, à l'aide de la figure 7, du ou des groupes principaux de systèmes de ventilation possibles, sur la base du genre de trafic habituel et de la longueur déterminante du tunnel, tels que définis aux points 1 et 2 ci-dessus.
- 4) Si l'on se trouve dans une zone intermédiaire entre deux groupes principaux de systèmes de ventilation, le choix doit être affiné à l'aide des paramètres déterminants exposés au §6.3.2 (attribution des secteurs A, B ou C).
- 5) Si l'on se trouve dans une zone intermédiaire et qu'il n'est pas possible d'attribuer un secteur A, B ou C avec les paramètres du §6.3.2 : le choix doit être déterminé par une évaluation globale et la solution choisie clairement motivée.

Si la démarche aboutit au choix d'un groupe principal différent pour l'un et l'autre des deux tubes d'un tunnel, il y a lieu d'examiner l'opportunité d'un tel résultat sous l'angle de la technique de construction.

Si, en vertu de la figure 7, on aboutit à la conclusion qu'aucune ventilation mécanique n'est nécessaire, il faut le confirmer au moyen d'un calcul des besoins en air frais.

Une investigation distincte réalisée de la manière décrite au §6.3.3 doit être effectuée pour établir s'il est nécessaire de diminuer les charges polluantes supplémentaires au voisinage des portails. On pourra en déduire la nécessité ou non de mettre en œuvre, pour des raisons environnementales, une aspiration de l'air vicié du tunnel.

6.2 Principaux genres de trafic

Sur la base de considérations relatives à la sécurité, il y a lieu de distinguer les trois genres de trafic suivants, selon [3, page 159] :

- TU 1: trafic unidirectionnel avec faible fréquence d'embouteillages ;
TU 2: trafic unidirectionnel avec forte fréquence d'embouteillages ;
TB : trafic bidirectionnel.

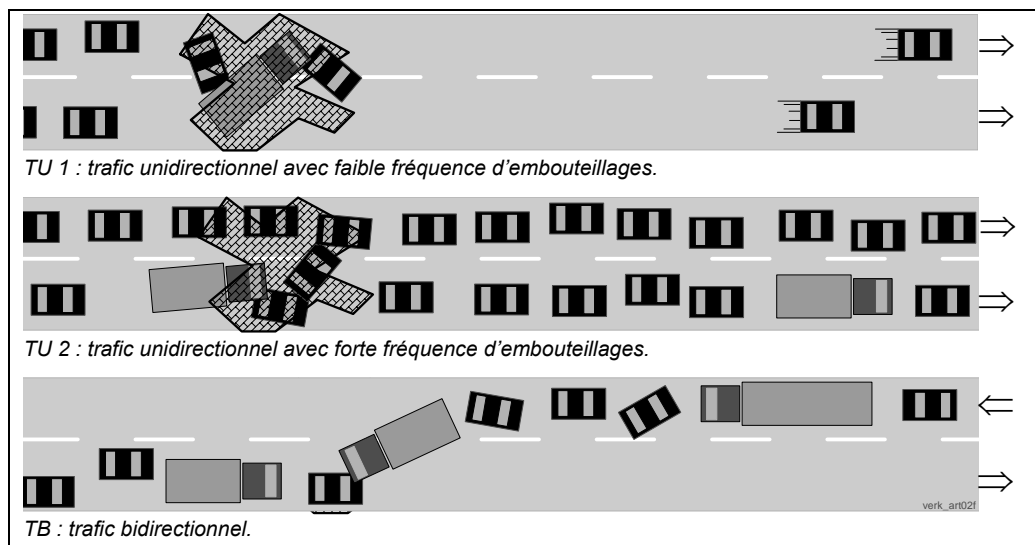


Fig. 6 : principaux genres de trafic selon la situation de la circulation en cas de sinistre.

Dans les tunnels unidirectionnels, il y a lieu de distinguer entre un sinistre se déclarant en cas de circulation fluide et un sinistre se déclarant en cas de bouchon. Dans le premier cas, lors d'un sinistre sans bouchon, la fumée se propagera dans la même direction que les véhicules, au début du si-

nistre tout au moins (figure 6, TU 1). Les véhicules ayant déjà dépassé l'endroit du sinistre quittent le tunnel. Par conséquent, aucun usager n'est en danger immédiat.

Dans le second cas, lors d'un sinistre avec bouchon, des usagers peuvent se trouver des deux côtés de l'endroit du sinistre, et il est possible que, dans l'immédiat, la fumée se propage de part et d'autre de celui-ci (figure 6, TU 2).

La situation est la même pour les tunnels bidirectionnels, dans lesquels les véhicules créent des bouchons de part et d'autre de l'endroit du sinistre (figure 6, TB).

Si la probabilité d'un embouteillage est grande dans un tunnel unidirectionnel, il faudra dimensionner la ventilation en fonction d'un sinistre survenant dans un embouteillage ou à la fin de celui-ci. Lorsque cette probabilité est minime, ce cas n'a pas à être pris en considération dans le dimensionnement de l'installation de ventilation.

Il n'y a pas lieu de dimensionner la ventilation d'un tunnel unidirectionnel pour le cas de figure d'un sinistre survenant alors que le tunnel est exploité exceptionnellement en trafic bidirectionnel (§7.2.3).

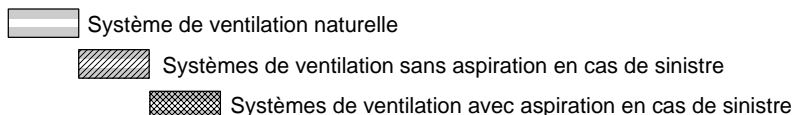
6.3 Détermination du groupe principal de système de ventilation

Les indications du §6.3 s'appliquent aux tunnels présentant des déclivités jusqu'à 5 %. Des déclivités plus importantes exigent des considérations particulières liées au déroulement chronologique des phénomènes se produisant en cas de sinistre.

Les trois groupes principaux de systèmes de ventilation sont présentés au chapitre 3.

6.3.1 Champs d'application des groupes principaux de systèmes de ventilation

Ces champs d'application sont définis en fonction du genre de trafic et de la longueur du tunnel :



Au besoin, l'attribution aux secteurs A, B ou C s'effectue à l'aide d'autres paramètres selon les données du §6.3.2.

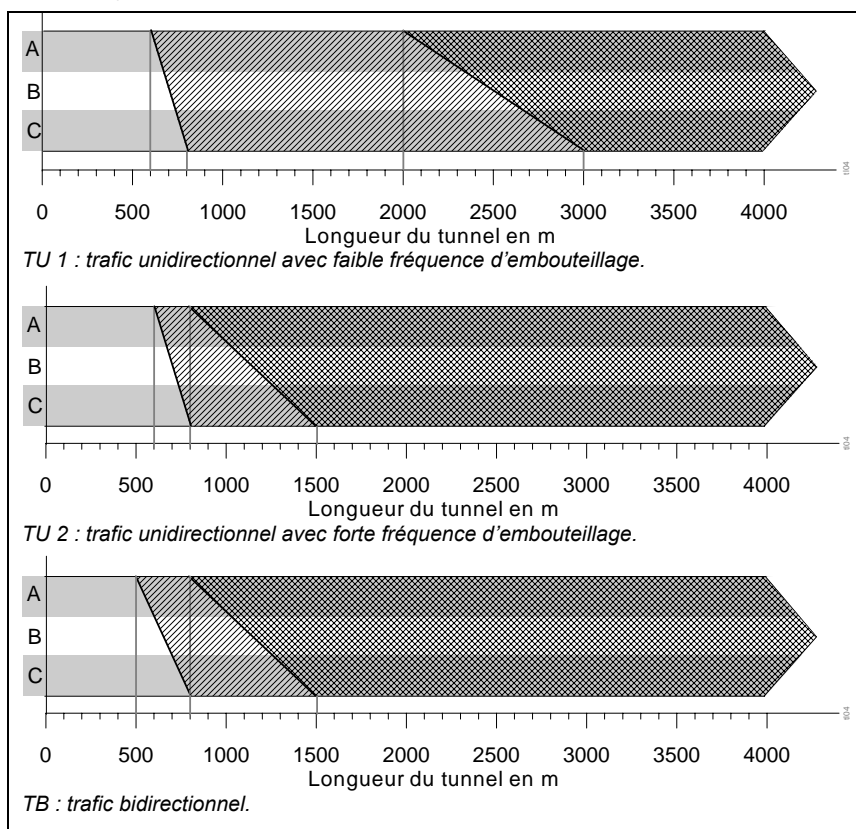


Fig. 7 : détermination du groupe principal de systèmes de ventilation en fonction d'aspects relevant de la technique de sécurité ; valable pour les tunnels avec des déclivités jusqu'à 5 %.

6.3.2 Autres paramètres déterminants

Si le genre de trafic et la longueur déterminante d'un tunnel ne permettent pas de définir avec certitude quel groupe principal de système de ventilation doit être mis en œuvre, il y a lieu d'intégrer dans l'évaluation les autres paramètres déterminants énumérés ci-dessous.

6.3.2.1 Trafic global

Le facteur déterminant est le trafic global l'année prévue de mise en service et 10 ans plus tard, exprimé en TJM, divisé par le nombre de voies de circulation, en moyenne pour chaque tube. On tiendra compte d'une capacité réduite des bretelles d'entrée et de sortie.

Évaluation partielle trafic global	TJM / nombre de voies de circulation	
	Trafic unidirectionnel	Trafic bidirectionnel
S (supérieur)	> 16'000	> 12'000
M (moyen)	11'000 à 16'000	8'000 à 12'000
I (inférieur)	< 11'000	< 8'000

Fig. 8 : évaluation du paramètre "trafic global".

6.3.2.2 Trafic des poids lourds

Le facteur déterminant est le nombre journalier moyen de poids lourds l'année prévue de mise en service et 10 ans plus tard, exprimé en PL par 24 h et par nombre de voies de circulation, en moyenne pour chaque tube.

Évaluation partielle trafic des poids lourds	PL / 24 h et nombre de voies de circulation	
	Trafic unidirectionnel	Trafic bidirectionnel
S	> 1'600	> 1'200
M	800 à 1'600	500 à 1'200
I	< 800	< 500

Fig. 9 : évaluation du paramètre "trafic des poids lourds"

6.3.2.3 Déclivité dans le tunnel

La déclivité agit sur les émissions des véhicules et à cause de la vitesse réduite des poids lourds, sur la ventilation naturelle. L'effet de cheminée entre les portails situés à des altitudes différentes peut provoquer des flux d'air longitudinaux très importants, en particulier en cas d'incendie.

La pente déterminante est la valeur la plus défavorable de la pente moyenne sur une longueur de 800 m (s'applique avec ou sans aspiration). Dans les tunnels à deux tubes, l'analyse doit être faite séparément pour chaque tube.

Évaluation partielle déclivité	Déclivité moyenne max. par tronçons de 800 m, en %		
	Trafic unidirectionnel TU 1	Trafic unidirectionnel TU 2	Trafic bidirectionnel TB
S	< - 3	< - 3 et > + 3	> 3
M	- 3 à + 3	- 3 à - 1.5 et + 1.5 à + 3	1.5 à 3
I	> + 3	- 1.5 à + 1.5	0 à 1.5

Fig. 10 : évaluation du paramètre déclivité ; valeurs négatives : descente; valeurs positives : montée.

Dans la perspective de la maîtrise d'un incendie dans un tunnel présentant une déclivité < - 5 % pour le cas de trafic unidirectionnel avec faible fréquence de bouchons et < - 5 % ou > + 5 % pour les cas de trafic unidirectionnel avec forte fréquence de bouchons, des investigations plus poussées, tenant compte du déroulement chronologique du sinistre, doivent être effectuées, selon les indications du §7.2. Cela vaut aussi pour les tunnels bidirectionnels présentant une déclivité supérieure à 5 %.

6.3.2.4 Évaluation globale

La figure 11 présente l'évaluation globale des paramètres principaux, établie sur la base des trois évaluations partielles illustrées par les figures 8 à 10. L'évaluation globale est à utiliser dans la figure 7, lorsqu'une analyse plus poussée le nécessite.

Évaluation globale	Évaluations partielles (l'ordre est indifférent)
A	S-S-S, S-S-M, S-S-I, S-M-M
B	S-M-I, S-I-I, M-M-M, M-M-I
C	M-I-I, I-I-I

Fig. 11 : évaluation globale des paramètres déterminants en fonction des évaluations partielles.

6.3.3 Diminution des nuisances additionnelles à proximité des portails

Les paramètres indiqués ci-dessus ont une incidence sur la qualité de l'air dans le tunnel ou sur la sécurité. En plus de ces paramètres, des critères propres à maintenir une certaine qualité de l'air dans les zones des portails peuvent favoriser certains systèmes de ventilation ou pousser à la mise en place d'installations d'aspiration d'air vicié supplémentaires (§7.3.1).

6.4 Détermination du système de ventilation

6.4.1 Généralités

Les analyses faites au §6.3 aboutissent au choix du groupe principal de systèmes de ventilation. Les systèmes possibles sont indiqués au tableau 12.

	Groupes principaux de systèmes de ventilation		
	Ventilation naturelle (§3.2)	Ventilation sans aspiration (§3.3)	Ventilation avec aspiration (§3.4)
Systèmes de ventilation usuels	Ventilation naturelle	Ventilation longitudinale avec ventilateurs de jet sans aspiration (figures 1 et 2)	Ventilation avec aspiration et ventilateurs de jet sans apport d'air frais (figure 3) <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> Ventilation avec aspiration ventilateurs de jet et apport d'air frais (figure 4)

Fig. 12 : systèmes de ventilation usuels.

6.4.2 Groupe principal de ventilation sans aspiration

Étant donné le faible niveau des valeurs d'émissions actuelles, une ventilation longitudinale sans aspiration de fumée ou d'autres gaz dégagés lors d'un sinistre peut généralement être réalisée avec des ventilateurs de jet. Une aspiration ponctuelle (fig. 2) peut être judicieuse s'il n'est pas autorisé, pour des raisons environnementales, de laisser l'air du tunnel s'échapper librement par un portail (§7.3.1).

6.4.3 Groupe principal de ventilation avec aspiration

Un apport d'air frais n'est nécessaire que dans des cas exceptionnels dans les nouveaux tunnels. Le calcul des besoins d'air frais selon le chapitre 7 permet de vérifier si un tel apport est nécessaire ou non.

7 DIMENSIONNEMENT

La ventilation est dimensionnée pour l'exploitation normale et pour l'exploitation en cas de sinistre. Sont déterminantes les exigences les plus sévères qui en découlent.

Les descriptions figurant dans le chapitre 7 se limitent à la présentation des particularités de la technique de ventilation et des valeurs empiriques nécessaires pour unifier les calculs. On trouvera dans la littérature spécialisée les équations physiques fondamentales.

7.1 Dimensionnement pour l'exploitation normale

La notion d'exploitation normale recouvre l'ensemble des cas de trafic considérés dans la phase de planification, y compris, le cas échéant, les cas de trafic bidirectionnel exceptionnels dans les tunnels unidirectionnels, ainsi que les cas de trafic congestionné et de bouchons.

Les paragraphes 7.1.1 à 7.1.6 donnent des indications relatives au trafic, aux émissions des véhicules, aux calculs des besoins en air frais et des flux d'air. Les §7.1.7 et 7.1.8 proposent des considérations relatives aux systèmes de ventilation mécanisés.

7.1.1 Données concernant le trafic

7.1.1.1 Trafic déterminant

Pour dimensionner la ventilation, il faut considérer la valeur maximale du trafic horaire déterminant (THD), sur une période de 10 ans à compter de la mise en service du tunnel (§5.2). Dans les tunnels unidirectionnels, on considérera chaque tube séparément.

7.1.1.2 Cas de trafic

Pour le cas d'exploitation normale, le dimensionnement de l'installation de ventilation sera généralement basé sur le cas de trafic fluide, avec une vitesse de 40 km/h ou plus. Les cas de circulation congestionnée ou de bouchons ne seront considérés que s'ils risquent de se produire régulièrement, c'est-à-dire pendant plus de 50 heures par année. S'il n'existe aucune estimation prévisionnelle donnant une idée de la fréquence des cas de circulation congestionnée, on pourra l'estimer en se fondant sur les indications en annexe (§II.3). Si, de plus, le THD se situe dans le domaine des fortes fréquences de bouchons et s'il est impossible d'éviter des bouchons dans le tunnel, il y a lieu de dimensionner l'installation de ventilation à partir des cas de circulation congestionnée et avec bouchons. Il y a également lieu de prendre en compte d'éventuelles particularités du réseau routier qui ont une incidence sur le flux du trafic, notamment les changements de voies dans un tunnel ou à proximité de son entrée.

7.1.1.3 Trafic bidirectionnel exceptionnel

Dans le choix du système de ventilation d'un tunnel unidirectionnel, on ne prendra pas en considération le cas du trafic bidirectionnel exceptionnel dans un tube. En revanche, on tiendra compte de ce cas de figure dans le dimensionnement du système de ventilation choisi pour l'exploitation normale, en y intégrant des mesures telles que déviations du trafic et interruptions d'exploitation de courte durée.

7.1.1.4 Densité du trafic

Compte tenu de l'encombrement longitudinal requis pour les poids lourds, on considère, pour le trafic en mouvement et par analogie à [4, page 7], les équivalences suivantes, les valeurs de la déclivité se référant à des moyennes sur 800 m de longueur (s'appliquent aux descentes et aux montées) :

- dans des sections dont la déclivité ne dépasse pas 2,5 % $2 \text{ UVT} \approx 2 \text{ VT} \approx 1 \text{ PL}$;
- dans des sections dont la déclivité varie entre 2,5 et 4 % $3 \text{ UVT} \approx 3 \text{ VT} \approx 1 \text{ PL}$;
- dans des sections dont la déclivité est supérieure à 4 % $4 \text{ UVT} \approx 4 \text{ VT} \approx 1 \text{ PL}$.

Lorsque les véhicules sont arrêtés, on admettra une densité de trafic de 150 UVT/km et l'équivalence $2 \text{ UVT} \approx 2 \text{ VT} \approx 1 \text{ PL}$ par voie de circulation.

7.1.1.5 Vitesse de circulation

Pour le trafic fluide, on appliquera les vitesses suivantes :

$$v_{VT} = v_{sig} \quad [\text{km/h}] \quad \text{Éq. 7-1}$$

$$v_{PL} = \text{MIN}(v_{PL,max}, v_{VT}) \quad [\text{km/h}] \quad \text{Éq. 7-2}$$

où v_{VT} et v_{PL} représentent les vitesses de circulation des voitures de tourisme et des poids lourds, et v_{sig} est la vitesse maximale admissible.

$v_{PL,max}$ est tirée de la figure 13.

	Descente			Palier	Montée		
Déclivité in %	- 6	- 4	- 2	0	2	4	6
$v_{PL,max}$ in km/h	60	80	100	100	90	70	60

Fig. 13 : vitesse maximale des poids lourds $v_{PL,max}$ sur des tronçons de différentes déclivités, à considérer pour le dimensionnement de la ventilation.

Les valeurs de la figure 13 pour les déclivités importantes sont tirées de mesures effectuées sur un tronçon de transit. Pour une grande partie du trafic lourd régional, les vitesses maximales des poids lourds sur des déclivités importantes sont plus faibles.

S'il n'existe pas de voie de dépassement, on prendra également comme vitesse limite des voitures de tourisme (VT) une valeur v_{VT} égale à la vitesse maximale $v_{PL,max}$ des poids lourds (PL).

7.1.1.6 Capacité des tunnels

Par analogie aux données de [4, page 7] et à partir d'analyses de postes de comptage, on situe la capacité des tunnels dans les fourchettes indiquées aux figures 14 et 15. Les courbes limites supérieures correspondent à un tunnel à tracé pratiquement rectiligne, avec un taux élevé de trafic longue distance et professionnel. Les courbes limites inférieures correspondent à un tunnel emprunté essentiellement par du trafic de loisirs et de tourisme.

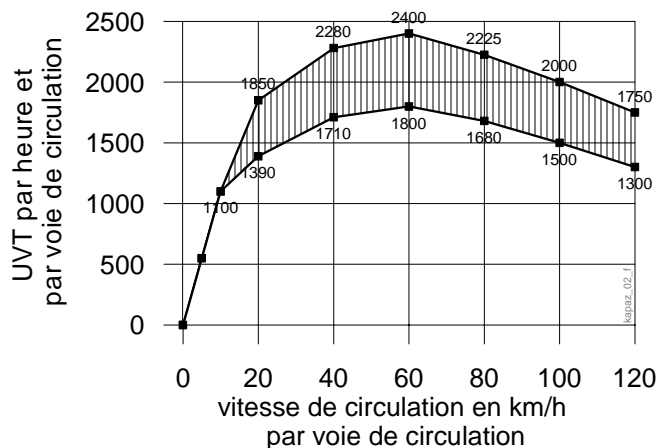


Fig. 14 : capacité des tunnels à trafic unidirectionnel.

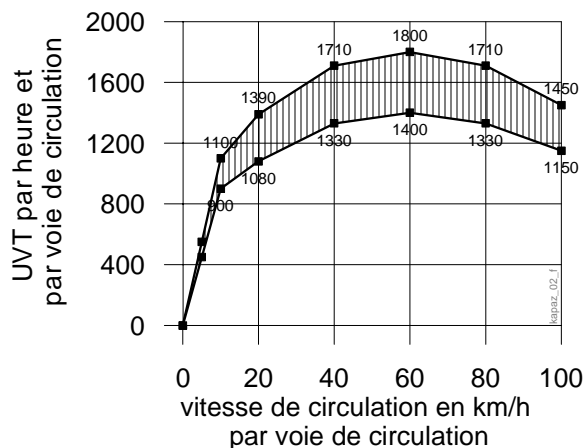


Fig. 15 : capacité des tunnels à trafic bidirectionnel.

7.1.2 Valeurs de dimensionnement pour la qualité de l'air

Dans le dimensionnement de la ventilation, on admettra les valeurs suivantes de la qualité de l'air dans l'espace de circulation (cf. [5]) :

Concentration CO $c_{lim,CO}$ [ppm]	Opacité $k_{lim,op}$ [m ⁻¹]
70	0.005

Fig. 16 : qualité de l'air dans l'espace de circulation, valeurs de dimensionnement.
(Valeurs limites de la qualité de l'air dans l'espace de circulation : voir figure 28 p.30.)

Pour ce qui concerne le dioxyde d'azote NO₂, il est recommandé dans [6] de ne pas dépasser la valeur de 2'000 µg/m³ (1 ppm) dans l'espace de circulation, pour une oxydation de 10 % (NO₂/NO_x). Cette valeur pourra être respectée dans tous les cas avec les valeurs indiquées pour la concentration de CO et pour l'opacité. Par conséquent, il est superflu de procéder à un dimensionnement spécifique pour le NO₂.

7.1.3 Calcul des émissions

Le calcul des émissions de CO et de l'opacité générée par les différents véhicules est décrit dans l'annexe III.

Les règles applicables sont les suivantes :

- La catégorie des voitures de tourisme (VT) comprend tous les véhicules hormis les poids lourds (PL) ;
- La catégorie des voitures de tourisme est subdivisée en VT à essence et VT diesel ;
- La catégorie des poids lourds rassemble les autobus, les camions, les trains routiers ainsi que les semi-remorques ;
- Le poids total moyen des poids lourds doit être évalué pour chaque tunnel en fonction des quatre segments de trafic indiqués ci-dessous (cf. [5]) :
 - dans le trafic urbain 12 t ;
 - dans le trafic régional 18 t ;
 - dans le trafic national 22 t ;
 - dans le trafic de transit 70 % du poids limite local.

7.1.4 Besoins en air frais

La quantité d'air frais nécessaire Q_{af} doit être déterminée pour tous les cas de trafic considérés, aussi bien pour le CO que pour les matières opacifiantes.

Pour les tunnels bidirectionnels, les calculs doivent se faire compte tenu de la répartition directionnelle suivante du trafic :

Direction 1	20 %	40 %	60 %	80 %
Direction 2	80 %	60 %	40 %	20 %

Fig. 17 : répartition directionnelle du trafic pour le calcul des besoins en air frais en cas de trafic bidirectionnel.

Le calcul des besoins en air frais se fait dans la continuité de la détermination des émissions des véhicules en fonction de l'annexe III.

7.1.4.1 Besoins en air frais relatifs aux émissions de CO

Émissions totales de CO sur la longueur du tunnel ou de la section L_{tunnel} :

$$E_{CO} = (n_{VT} \cdot e_{VT,CO} + n_{PL} \cdot e_{PL,CO}) / 3'600 \quad [m^3/s] \quad \text{Éq. 7-3}$$

Dans cette équation, n_{VT} est le nombre de VT et n_{PL} le nombre de PL dans le tunnel ou sur le tronçon considéré lorsque le trafic est fluide, sur la base du THD déterminant, et lorsque le flux de trafic est perturbé, sur la base de la capacité selon le §7.1.1. En cas de variation des émissions le long d'un tunnel ou entre une voie de circulation et l'autre, l'émission totale est constituée par la somme des émissions de chaque élément.

La quantité d'air frais nécessaire pour diluer suffisamment les émissions de CO est la suivante :

$$Q_{af,CO} = \frac{E_{CO}}{c_{lim,CO}} \cdot 10^6 \quad [m^3/s] \quad \text{Éq. 7-4}$$

avec $c_{lim,CO}$ en ppm selon figure 16.

7.1.4.2 Besoins en air frais nécessaires pour limiter l'opacité

Émissions totales de matières opacifiantes sur la longueur du tunnel ou de la section L_{Tunnel} :

$$E_{op} = (n_{VT} \cdot e_{VT,op} + n_{PL} \cdot e_{PL,op}) / 3'600 \quad [m^2/s] \quad \text{Éq. 7-5}$$

Dans cette équation, n_{VT} est le nombre de VT et n_{PL} le nombre de PL dans le tunnel ou sur le tronçon considéré ; lorsque le trafic est fluide, sur la base du THD déterminant et lorsque le flux de trafic est perturbé, sur la base de la capacité selon le §7.1.1. En cas de variation des émissions le long d'un tunnel ou entre une voie de circulation et l'autre, l'émission totale est constituée par la somme des émissions partielles.

La quantité d'air frais nécessaire pour atténuer l'opacité est la suivante :

$$Q_{af,op} = \frac{E_{op}}{k_{lim,op}} \quad [m^3/s] \quad \text{Éq. 7-6}$$

avec $k_{lim,op}$ en m^{-1} selon figure 16

7.1.4.3 Besoin minimal en air frais

Pour des raisons de régulation de l'installation de ventilation, on demande pour le dimensionnement le débit minimal d'air frais $Q_{FL,min}$ en fonction de la section de l'espace de circulation A_{tunnel} .

$$Q_{af,min} = A_{tunnel} \cdot 1.5 \text{ m/s} \quad [m^3/s] \quad \text{Éq. 7-7}$$

De plus, une ventilation longitudinale doit être dimensionnée de manière à pouvoir atteindre un temps de renouvellement de l'air de 20 minutes.

7.1.4.4 Besoin déterminant en air frais

Le débit d'air frais nécessaire, qui est à déterminer séparément pour chaque cas de trafic, se calcule comme suit :

$$Q_{af} = \text{MAX}(Q_{af,CO}, Q_{af,op}, Q_{af,min}) \quad [m^3/s] \quad \text{Éq. 7-8}$$

7.1.5 Influences météorologiques et thermiques (voir aussi §VII.2.5)

La différence de pression Δp_{mt} due aux influences météorologiques et thermiques comprend les éléments suivants :

Différence de pression barométrique

Dans les tunnels qui traversent des chaînes de montagne, la différence de pression barométrique entre les portails peut atteindre plusieurs centaines de Pa et rester constante pendant de longues périodes (heures, jours). Pour le dimensionnement, on utilisera 95 % de la valeur maximale dans la direction la plus défavorable.

Différence de pression due à la température

La température dans l'espace de circulation est généralement quasi constante et se situe souvent quelques degrés Kelvin au-dessus de la température annuelle moyenne à l'extérieur du tunnel. Les flux d'air créés naturellement varient avec les fluctuations de la température extérieure durant la journée et durant l'année. On peut estimer l'intensité de ces flux d'air à l'aide de statistiques des températures ambiantes (éq. 7-19). Pour le dimensionnement, on utilisera 95 % de la valeur maximale dans la direction la plus défavorable.

Pression due au vent

La pression due au vent sur les portails équivaut en général à quelques Pa et subit de très rapides variations. Pour le dimensionnement, on détermine la pression dynamique en prenant la valeur moyenne de la vitesse du vent de la direction la plus défavorable sur le portail.

La base du dimensionnement découle de l'effet combiné de ces trois paramètres.

7.1.6 Données entrant dans les calculs de l'écoulement

Densité de l'air

Pour le calcul des pertes de pression, on admettra une densité moyenne de l'air en fonction de l'altitude H en m équivalant à :

$$\rho_L = 1.22 - 1.08 \cdot 10^{-4} \cdot H \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{Éq. 7-9}$$

Pour l'alimentation électrique, on prendra en compte la puissance des ventilateurs aux basses températures locales usuelles, ainsi qu'aux hautes densités d'air correspondantes.

Données concernant les véhicules

On calculera la surface apparente d'une voiture moyenne et d'un camion moyen soumis à un flux d'air frontal selon la formule suivante :

$$(c_W \cdot A_{\text{front}})_{VT} = 0.9 \quad [\text{m}^2] \quad \text{Éq. 7-10}$$

$$(c_W \cdot A_{\text{front}})_{PL} = 5.2 \quad [\text{m}^2] \quad \text{Éq. 7-11}$$

L'effet de pression induit par le trafic sur l'air de l'espace de circulation, résulte de la somme des différences de vitesse de chaque véhicule, par rapport à celle de l'air à l'endroit du véhicule considéré.

$$\Delta p_{vhc} = \rho / 2 \cdot (v_{vhc} - v_{air})^2 \cdot (c_W \cdot A_{\text{front}})_{vhc} / A_{\text{tunnel}} \quad [\text{Pa}] \quad \text{Éq. 7-12}$$

$$\Delta p_{\text{trafic}} = \sum_{vhc} \Delta p_{vhc} \quad [\text{Pa}] \quad \text{Éq. 7-13}$$

Données concernant le tunnel (valeurs indicatives)

Les coefficients de perte de pression du flux d'air dans le(s) tube(s) du tunnel sont :

$$\text{coefficient de perte à l'entrée du tube} \quad \zeta_e = 0.6 \quad [-] \quad \text{Éq. 7-14}$$

$$\text{coefficient de perte à la sortie du tube} \quad \zeta_s = 1.0 \quad [-] \quad \text{Éq. 7-15}$$

$$\text{coefficient de frottement du tube} \quad \lambda = 0.015 \quad [-] \quad \text{Éq. 7-16}$$

(anneau intérieur bétonné avec infrastructure usuelle)

La perte de pression résultante dans le tube du tunnel est :

$$\Delta p_{\text{frottement}} = \rho / 2 \cdot v_{air}^2 \cdot (\zeta_e + \lambda \frac{L_{\text{tunnel}}}{D_h} + \zeta_s) \quad [\text{Pa}] \quad \text{Éq. 7-17}$$

Le cas échéant, il faut également tenir compte des pertes locales, par exemple du fait d'édifices ou de modifications de la section.

7.1.7 Indications relatives aux systèmes sans aspiration

Les remarques relatives au cas de sinistre se trouvent au §7.2.3.

La pression à fournir par les ventilateurs de jet Δp_{eff} résulte de la somme des effets de pression dus au trafic et des pertes de frottement du flux d'air le long du tunnel, compte tenu des besoins en air frais Q_{af} , ainsi que des contre-pressions dues aux facteurs météorologiques et thermiques. Les données nécessaires sont décrites aux paragraphes 7.1.5 et 7.1.6.

$$\Delta p_{\text{néc}} = \Delta p_{\text{trafic}} + \Delta p_{\text{frottement}} + \Delta p_{\text{mt}} \quad [\text{Pa}] \quad \text{Éq. 7-18}$$

Étant donné l'effet de ventilation généré par la circulation, le cas de trafic nécessitant la plus grande quantité d'air frais n'est pas nécessairement celui qui exige la pression maximale des ventilateurs de jet. Pour calculer la pression nécessaire de ces derniers, on fait varier la répartition directionnelle du trafic par pas de 20 % comme indiqué à la figure 17. Le cas d'un volume de trafic durablement équivalent dans chaque sens de circulation n'est pas à considérer.

On tiendra compte de la vitesse maximale des poids lourds correspondant à la déclivité du tunnel, selon la figure 13. Le flux d'air généré par les ventilateurs doit être dirigé dans le sens de l'écoulement se produisant lorsque les ventilateurs de jet sont hors service.

La vitesse maximale de l'air entretenue par le système de ventilation dans l'espace de circulation pour répondre à la demande d'air frais ne doit pas dépasser 6 m/s dans les tunnels bidirectionnels et 10 m/s dans les tunnels unidirectionnels [4, p.47].

On trouvera d'autres informations sur les ventilateurs de jet dans l'annexe IV.

7.1.8 Indications relatives aux systèmes avec aspiration

Les remarques relatives au cas de sinistre figurent au §7.2.4.

7.1.8.1 Section des gaines

La section des gaines et des puits peut avoir une influence importante sur la puissance installée nécessaire, et donc sur la consommation d'énergie. La section des gaines doit être vérifiée à l'aide d'un dimensionnement aéraulique. Le cas échéant, on optimisera les dimensions de l'installation à l'aide des données de l'annexe VI.

Les gaines de ventilation doivent être parcourable.

7.1.8.2 Apport d'air frais

Dans un tunnel où il est réparti sur toute la longueur, l'air frais doit déboucher environ 50 cm au-dessus de la chaussée. Une injection par les ouvertures aménagées dans la dalle intermédiaire n'est pas admissible (voir §7.2.4).

Dans tous les cas d'exploitation avec apport d'air frais, une surpression minimale de 250 Pa par rapport à l'espace de circulation doit régner dans le canal d'air frais. Le dimensionnement se fait pour un état stationnaire, sans influence des véhicules.

7.1.9 Empêchement de courts-circuits dans les flux d'air

Il importe de minimiser le transfert dans l'autre tube de l'air vicié sortant du portail d'un tube. On observe les indications du §7.2.6.

7.2 Dimensionnement pour l'exploitation en cas de sinistre

Les paragraphes 7.2.1 et 7.2.2 renferment les indications relatives aux sinistres sur la base desquels les installations de ventilation sont dimensionnées. Par ailleurs, on trouvera des conseils concernant les systèmes de ventilation mécanique (§7.2.3 à 7.2.7).

7.2.1 Sinistres de référence pour le dimensionnement des ventilations

L'AIPCR [3, page 63] conclut à partir de différentes sources – parmi lesquelles les essais EUREKA 1998 [7] – que, lors d'un incendie, il faut s'attendre pendant une durée significative aux puissances thermiques maximales indiquées ci-dessous :

Véhicule en feu	Puissance thermique nominale [MW]
voiture	2 à 5
camionnette de livraison	15
bus	20
camion chargé	20 à 30

Fig. 18 : puissances thermiques nominales d'incendie de différents véhicules selon [3].

Les incendies de grands véhicules de transport tels que les trains routiers et les semi-remorques, convoyant des marchandises inflammables peuvent dégager des puissances thermiques très élevées, comme l'illustre la figure 18. L'essai EUREKA impliquant un semi-remorque chargé de deux tonnes de meubles a dégagé une puissance thermique maximale de 100 à 120 MW, pendant un très court instant.

Comparativement à la durée totale de l'incendie (une heure environ), la puissance thermique nominale est atteinte ou dépassée pendant seulement quelques minutes (cf. [7] et [8]).

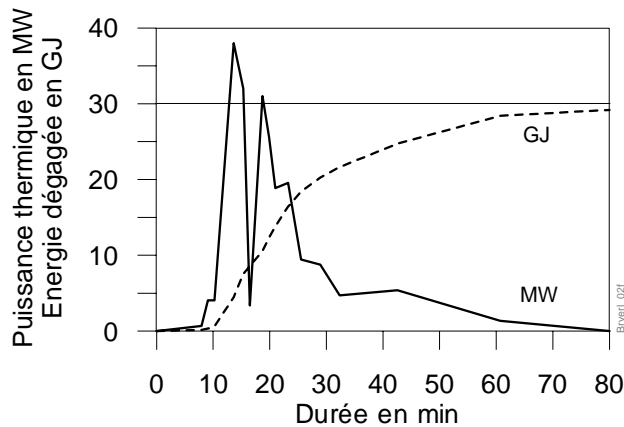


Fig. 19 : puissance thermique et énergie dégagée par un camion chargé.
(Puissance thermique nominale 30 MW [7, 8]).

L'incendie total d'un camion chargé produit des températures élevées. Lorsque les conditions aérodynamiques sont favorables, celles-ci permettent une propagation stratifiée de la fumée sous la dalle intermédiaire, jusqu'à une distance de quelques centaines de mètres du lieu de l'incendie. Dans le cas d'un incendie dégageant moins de chaleur et, plus généralement, lorsque les conditions aérodynamiques sont défavorables, il faut compter avec un enfumage total de la section du tunnel.

Par ailleurs, il faut aussi considérer les accidents lors desquels sont dégagées des substances dangereuses sans qu'il y ait d'incendie ; c'est-à-dire avec une puissance d'incendie de 0 MW. Les équipements usuels de mesure et de détection ne permettent d'identifier des sinistres sans incendie que de manière optique. Si un poids lourd est impliqué dans un sinistre, il faut a priori considérer que des substances volatiles dangereuses pourraient être dégagées. Dans ce cas, il est judicieux d'exploiter l'installation de ventilation comme dans le cas d'un incendie.

Compte tenu de ces éléments, l'installation de ventilation doit être dimensionnée sur la base des paramètres suivants :

	Sinistre	
	Dégagement de substances	Incendie d'un poids lourd
Puissance thermique nominale	0 MW	30 MW
Énergie libérée	0 GJ	30 GJ
Production de gaz dangereux	20 m ³ /s	80 m ³ /s
Durée	≥ 20 min	≥ 60 min

Fig. 20 : Sinistres de référence pour le dimensionnement d'une installation de ventilation.

Pour dimensionner des installations de ventilation, on considérera un incendie local stationnaire. En guise de lieu potentiel du sinistre, on considérera la totalité de la longueur du tunnel.

7.2.2 Pression due aux courants ascendants et à la différence de pression entre les portails (voir aussi §VII.2.5)

Dans les tunnels en pente, une pression sur l'air de l'espace de circulation se crée en raison de différences de température de l'air. Ce courant ascendant, exprimé par les équations 7-19 et 7-20, doit être pris en compte dans le dimensionnement de la ventilation.

$$\Delta p_{nat} = (\rho_e - \rho_i) \cdot g \cdot L_{tunnel} \cdot Décl \quad [\text{Pa}] \quad \text{Éq. 7-19}$$

$$\Delta p_{incendie} = (\rho_i - \rho_{incendie}) \cdot g \cdot L_{incendie} \cdot Décl_{incendie} \quad [\text{Pa}] \quad \text{Éq. 7-20}$$

$$\text{avec } \rho_n = \frac{p_{atm}}{R_L \cdot T_n} \quad \text{et } n = \{i, a, incendie\} \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{Éq. 7-21}$$

$Décl_{incendie}$ désigne la déclivité sur le tronçon de longueur $L_{incendie}$.

Les 'sinistres' de dimensionnement du système de ventilation sont caractérisés par les valeurs suivantes (cf. [8]) :

	Dégagement de substances	Sinistre Incendie d'un poids lourd	
		sans (avant) aspiration	avec aspiration
$\Delta T_{\text{incendie}}$	0 K	65 K	135 K
L_{incendie}	-	800 m	300 m

Fig. 21 : valeurs normalisées pour la détermination du courant ascendant (voir aussi figure 22).

Les valeurs de mesure des températures indiquées dans [8] donnent le profil de courant ascendant illustré à la figure 22, lorsque l'écoulement incident a la vitesse critique et que le tunnel considéré a une pente constante. La courbe peut être adaptée aux autres situations (pente variable, sortie d'air à un portail, propagation symétrique).

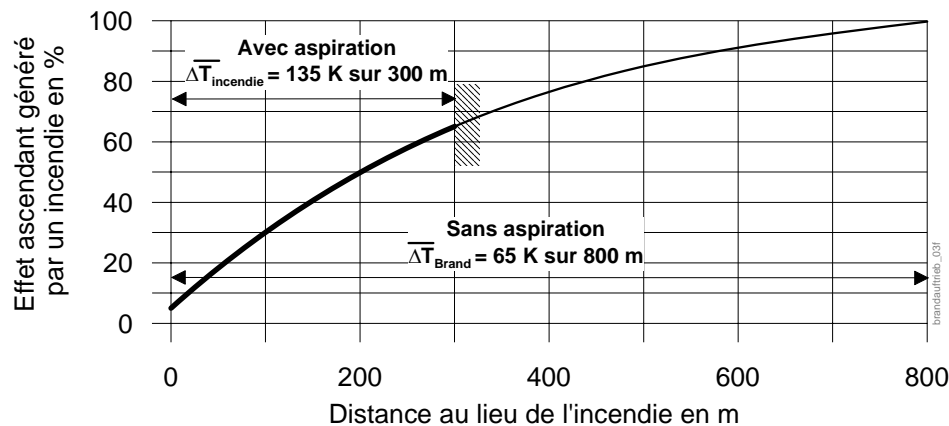


Fig. 22 : répartition locale du courant ascendant généré par un incendie, lorsque l'écoulement incident a la vitesse critique et le tunnel une pente constante.

Pour le calcul des processus instationnaires, on peut admettre que la pression augmente linéairement pendant 10 minutes jusqu'au moment où l'incendie atteint son maximum.

Pour la différence de pression météorologique entre les portails due aux écarts de la pression barométrique et au vent ainsi qu'à la différence de température naturelle entre l'espace de circulation et le voisinage, on prendra les valeurs indiquées au §7.1.5.

7.2.3 Indications relatives aux systèmes sans aspiration

7.2.3.1 Généralités

Dans les tunnels dotés sans système d'aspiration, la propagation des gaz dans l'espace de circulation peut être influencée par des ventilateurs de jet. L'annexe IV fournit des valeurs indicatives pour la pression nécessaire et pour la détermination du nombre de ventilateurs de jet.

7.2.3.2 Exigences relatives au dimensionnement des ventilateurs de jet

Pour dimensionner les ventilateurs de jet, on considérera l'endroit le plus défavorable dans le tunnel. Les cas de figure présentés ci-après, constituent la base pour le dimensionnement de ventilateurs aptes à gérer des sinistres.

Genre de trafic (§6.1)	Sens de circulation à l'endroit du sinistre	Énergie thermique libérée	Ventilation longitudinale requise
TU 1	Descente	incendie d'un PL	3 m/s vers le bas
	Montée	incendie d'un PL nulle	3 m/s vers le haut 1.5 m/s vers le haut
TU 2	Descente	incendie d'un PL	3 m/s vers le bas
	Montée	incendie d'un PL incendie d'un PL nulle	1.5 m/s vers le bas 3 m/s vers le haut 1.5 m/s vers le haut
TB	Descente et montée	incendie d'un PL	1.5 m/s vers le bas

Fig. 23 : exigences posées à l'écoulement longitudinal de l'air, pour le dimensionnement de ventilateurs de jet dans des systèmes sans aspiration. (Pour l'exploitation des ventilateurs de jet, voir §7.2.3.3).

Comme hypothèse de base pour le dimensionnement, on admettra une durée de 3 minutes entre le début du sinistre et la mise en service, respectivement, des ventilateurs de jet au régime adéquat et du programme de gestion du trafic. La longueur de la colonne de véhicules avant l'endroit du sinistre est déterminée sur la base du THD. En outre, pour les tunnels unidirectionnels avec forte fréquence de bouchons (TU 2), on admettra une colonne de véhicules d'une longueur équivalant au moins à 3/4 de la longueur du tunnel. Les influences météorologiques et thermiques sur l'écoulement longitudinal requis découlent du §7.1.5.

La ventilation d'un tunnel unidirectionnel ne doit pas être dimensionnée en fonction d'un sinistre survenant alors qu'il est exceptionnellement exploité en trafic bidirectionnel. Cependant, on tiendra compte de ce cas particulier dans l'exploitation (§7.2.3.3).

7.2.3.3 Exigences posées à l'exploitation automatique des ventilateurs de jet

Le flux d'air nécessaire en cas de sinistre se distingue en particulier en fonction du genre de trafic et de l'état momentané de celui-ci. Si des usagers du tunnel se trouvent de part et d'autre du sinistre (TB, cas échéant TU 2 ainsi que tube avec trafic bidirectionnel exceptionnel), il faut minimiser l'écoulement longitudinal à l'endroit du sinistre afin de permettre aux usagers de fuir de chaque côté du sinistre. L'exploitation des ventilateurs de jet doit être réglée à l'aide de la vitesse longitudinale en dehors de la zone sous influence du sinistre. Dans la zone où se tiennent les usagers du tunnel, il faudrait, dans la mesure du possible, éviter de perturber l'éventuelle stratification de la fumée sous la dalle intermédiaire.

Si les usagers du tunnel ne se trouvent que d'un seul côté du sinistre (TU 1 et TU 2 avec trafic fluide), les ventilateurs de jet peuvent fonctionner sans réglage dans le sens de circulation.

7.2.4 Indications relatives aux systèmes avec aspiration

7.2.4.1 Généralités

Dans les tunnels à deux tubes, les exigences minimales exposées dans le §7.2.4 doivent pouvoir être satisfaites individuellement et simultanément pour chaque tube. Des liaisons entre les canaux d'évacuation d'air de deux tubes parallèles pouvant être fermées par des clapets sont admises, mais ne permettent pas un dimensionnement inférieur aux exigences minimales.

En guise d'hypothèse de base pour le dimensionnement, on admet une durée de 4 minutes entre le début du sinistre et le moment où est atteint le régime d'exploitation prévu pour l'installation d'extraction d'air.

7.2.4.2 Capacité d'extraction et influence sur l'écoulement longitudinal (voir aussi §VII.2.1 et VII.2.2)

La capacité d'extraction doit être dimensionnée de manière à ce que, pour les sinistres de référence définis au §7.2.1, les valeurs suivantes des écoulements longitudinaux puissent être maintenues dans l'espace de circulation. Les exigences s'appliquent à la section de l'espace de circulation avec dalle intermédiaire.

Cas de trafic (§6.1)	Situation avant le sinistre	Flux en direction du sinistre	Zone dans le tunnel
TU 1	Trafic fluide	3 m/s 0 m/s	avant la zone d'aspiration (bouchon) après la zone d'aspiration
	TB except.*	1.5 m/s	de part et d'autre de la zone d'aspiration
TU 2	Trafic fluide	3 m/s 0 m/s	avant la zone d'aspiration (bouchon) après la zone d'aspiration
	Bouchon	1.5 m/s	de part et d'autre de la zone d'aspiration
	TB except.*	1.5 m/s	de part et d'autre de la zone d'aspiration
TB	Trafic fluide ou bouchon	1.5 m/s	de part et d'autre de la zone d'aspiration

* TB exceptionnel : non déterminant pour le dimensionnement.

Fig. 24 : exigences minimales posées à l'écoulement longitudinal dans la direction de l'endroit du sinistre pour des systèmes avec aspiration, valables pour le dimensionnement et l'exploitation.

L'apport d'air frais Q_{ap} dans la zone où les gaz sont dégagés, c'est-à-dire lors d'un incendie dans la zone initialement la plus enfumée, doit être minimisé et pris en compte dans la détermination du débit minimal d'air vicié. Pour respecter les valeurs prescrites dans la figure 24, il y a lieu d'assurer dans tous les cas, à l'endroit du sinistre, une extraction minimale $Q_{ae,min}$ de :

$$Q_{ae,min} = 3 \text{ m/s} \cdot A_{tunnel} + Q_{ap} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \text{Éq. 7-22}$$

où :

$$Q_{ae,min} \geq \text{débit volumique des gaz dégagés} + 20 + Q_{ap} \quad [m^3/s] \quad \text{Éq. 7-23}$$

doit toujours être réalisé (voir figure 20).

Les écoulements longitudinaux selon la figure 24 doivent être maintenus dans tous les cas analogues à ceux décrits à la figure 23 et pour tous les lieux possibles de sinistres. Pour cela, il y a lieu, soit d'augmenter le volume d'extraction par rapport à la valeur minimale selon l'équation 7-22, soit de contrôler l'écoulement longitudinal à l'aide de ventilateurs de jet. La combinaison adéquate entre le débit volumique de l'air extrait Q_{ae} et les ventilateurs de jet (type, nombre, disposition) résulte d'une optimisation. Dans ce cas, il y a lieu de tenir compte également de l'utilisation des ventilateurs de jet pour le cas d'exploitation normale.

Dans le dimensionnement des ventilateurs d'extraction, on tiendra compte de la perméabilité des clapets d'évacuation et de celle des canaux de ventilation Q_{fuites} .

$$Q_{ventilateur} = Q_{ae} + Q_{fuites} \quad [m^3/s] \quad \text{Éq. 7-24}$$

$Q_{ventilateur}$ est le débit volumique à déplacer par le nombre de ventilateurs d'extraction prévus (considération isotherme). Pour le cas particulier du dimensionnement des ventilateurs d'extraction à 400 °C (voir §8.3.1, résistance à la température), ceux-ci doivent être dimensionnés pour un débit d'air correspondant à $1.3 \times Q_{ventilateur}$.

7.2.4.3 Genre de dispositif d'extraction des fumées

L'extraction des fumées doit se faire au moyen de clapets télécommandés. Dans la zone du sinistre, le volume Q_{ae} doit être extrait sur une longueur de 200 m. Les clapets de ventilation doivent être disposés tous les 100 m environ. En général, il faut donc ouvrir 3 clapets.

Une extraction des fumées à proximité des portails n'est efficace que dans des cas exceptionnels. Le début du canal d'évacuation peut être éloigné de 300 m du portail. Les sections proches des portails conviennent à la mise en place de ventilateurs de jet.

La largeur des clapets de ventilation doit être aussi grande que possible, afin de limiter la quantité des gaz passant à côté de l'ouverture. Comme valeur indicative pour le dimensionnement de la surface des clapets, on peut admettre une composante verticale de la vitesse de 15 m/s (considération isotherme), en moyenne pour tous les clapets ouverts dans le secteur de l'incendie. Avec $Q_{ae} > Q_{ae,min}$, on admet une composante verticale de la vitesse d'écoulement de $15 \text{ m/s} \times Q_{ae}/Q_{ae,min}$.

Lors de la détermination de la section du canal de ventilation, on prendra en considération les exigences aérodynamiques (pression requise pour le ventilateur d'extraction, sollicitation du canal, uniformité du débit extrait par les clapets ouverts). Pour déterminer la hauteur du canal, on prendra en compte un accès suffisant aux clapets. Si l'accès se fait par le canal, la hauteur libre doit être d'au moins 1.80 m.

7.2.5 Analyse de scénarios

Comme indiqué aux paragraphes 7.2.3 et 7.2.4, l'installation de ventilation est dimensionnée de manière à entrer en action 3 à 4 minutes après le début du sinistre. Les effets d'une variation de cette condition doivent être analysés sur la base de scénarios. Le cas échéant, on tiendra compte de différents scénarios dans l'établissement des programmes de commande du système.

Pour déterminer la disposition des ventilateurs de jet ainsi que leur commande, de même que leur commande, on tiendra compte des phénomènes instationnaires au cours des 20 premières minutes suivant le sinistre.

7.2.6 Empêchement de courts-circuits dans les flux d'air

La recirculation de la fumée et des substances polluantes, soit d'un tube à l'autre d'un tunnel, soit entre les ouvrages d'évacuation de l'air vicié et les prises d'air, soit encore entre les portails, doit être évitée au moyen de mesures techniques appropriées. Dans les tunnels à deux tubes parallèles, il suffit généralement à cet effet de séparer une zone de sortie de 100 m de long d'une zone d'entrée de 30 m de long (figure 25) par une cloison de la hauteur de l'espace de circulation ou par un désaxement des portails. En présence de portails en tranchée ou de hautes cloisons antibruit, on augmentera les dimensions en proportion.

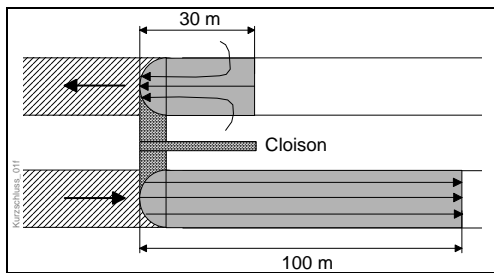


Fig. 25 : cloison destinée à éviter un court-circuit dans les flux d'air.

En cas de sinistre, la ventilation des tubes doit être exploitée de manière à éviter un court-circuit dans les flux d'air aux portails.

La distance minimale entre deux tunnels successifs est par conséquent de 60 m (traversée d'une vallée) à 200 m (galerie unilatérale entre les tunnels).

7.2.7 Redondances (voir aussi §VII.2.3)

Les redondances suivantes doivent être prévues pour les composants et les processus ayant une incidence particulière sur la sécurité :

Ventilateurs de jet	En cas de défaillance d'un groupe de ventilateurs de jet sous l'effet d'un incendie, la poussée des ventilateurs restants doit s'élever au moins à 90 % de la valeur de dimensionnement.
Ventilateurs d'extraction	En cas de défaillance d'un ventilateur d'extraction, le débit de l'air extrait doit s'élever au moins à 65 % de Q_{ae} (éq. 7-24) ; le reflux à travers le ventilateur d'extraction défaillant doit être empêché par un clapet de fermeture. L'exigence s'applique à chaque tube individuellement, même s'il existe entre les canaux d'extraction de tubes voisins une liaison permettant d'élever la capacité d'extraction de l'air vicié. Un débit d'air extrait équivalant à 65 % du débit volumique du ventilateur $Q_{ventilateur}$ (éq. 7-24) est admis pendant 72 heures sur une année sans redondance (par exemple durant les travaux de révision). Durant cette période, il y a lieu de mettre en œuvre des mesures propres à réduire le risque de sinistre.
Clapets de ventilation	Lorsqu'un des clapets de ventilation prévus pour l'extraction reste fermé dans la zone du sinistre, le débit d'air extrait à travers les clapets ouverts doit s'élever au moins à 90 % de la valeur de dimensionnement.
Mesure de l'écoulement d'air	Dans le cas où la valeur de la mesure de l'écoulement d'air est utilisée pour le pilotage en cas de sinistre, sa plausibilité doit pouvoir être vérifiée par trois mesures indépendantes (voir §8.2).
Contrôle de fonctions	la plausibilité des résultats des contrôles automatiques des fonctions doit pouvoir être testée.

7.3 Diminution des nuisances additionnelles à proximité des portails

7.3.1 Polluants atmosphériques

L'appréciation des atteintes à l'environnement au voisinage d'un tunnel est fondée sur l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair) [9].

L'aspiration de l'air du tunnel avant qu'il ne sorte par le portail et son évacuation par une cheminée peuvent préserver les abords immédiats du portail d'atteintes additionnelles dues à l'air vicié du tunnel. La nécessité d'extraire ainsi l'air vicié doit être examinée dans le cadre de l'étude d'impact sur l'environnement. Les tubes pour lesquels les charges polluantes aux portails dépassent les valeurs indiquées à la figure 26 nécessitent généralement des installations de ventilation destinées à réduire le débit d'air vicié sortant par le portail.

Voisinage	Charge polluante au portail en t NO _x /an
zone urbaine	> 10
constructions dispersées, zone d'habitation	> 20
constructions dispersées, zone industrielle	> 30
non construit, zone rurale	> 40

Fig. 26 : valeurs empiriques des charges polluantes de NO_x aux portails, au-delà desquelles des installations d'extraction sont à prévoir.

Pour le dimensionnement des cheminées de ventilation, on veillera à ce que leur hauteur ainsi que la vitesse d'expulsion de l'air à leur embouchure soient suffisantes (voir V p.48). On procédera à des études détaillées dans les zones où la densité des constructions est élevée.

Pour diminuer les nuisances additionnelles au voisinage des portails, et en particulier pour réduire leur moyenne sur une longue durée, l'installation de ventilation peut être pilotée en fonction de valeurs empiriques basées sur les courbes de variation du trafic. Il n'est pas opportun, pour piloter l'installation de ventilation, d'utiliser les concentrations mesurées dans la zone d'influence directe du tunnel.

Dans le bilan global coûts/avantages, il faut considérer comme un paramètre écologique l'énergie consommée pour la construction et l'exploitation de l'installation de ventilation. En l'état actuel des connaissances relatives aux nuisances provoquées par les polluants atmosphériques, et compte tenu de la réduction des émissions des véhicules à moteur ainsi que de la définition générale des priorités (minimisation de la consommation d'énergie, ainsi que des coûts de construction et d'entretien), on exclura l'éventualité de filtrer ou d'épurer l'air des tunnels.

7.3.2 Bruit des ventilateurs

L'appréciation des nuisances est fondée sur l'ordonnance sur la protection contre le bruit (OPbruit) [10].

Dans les conditions de circulation normales, les exigences de la protection contre le bruit doivent être respectées au voisinage des portails et dans la zone d'influence des prises d'air et des cheminées de ventilation.

7.4 Optimisation de l'installation

Lors du dimensionnement de l'installation, il y a lieu de tenir compte des coûts d'investissement et d'exploitation. A cet effet, on appliquera la démarche de l'annexe VI p.50.

7.5 Ventilation des locaux d'exploitation

Dans les locaux d'exploitation, les conditions prescrites pour les places de travail, relatives à la qualité, à la température et à l'humidité de l'air, doivent être respectées. Par ailleurs, les équipements doivent être protégés contre la saleté et contre des températures et des taux d'humidité excessifs. A cet effet, il faut généralement prévoir une installation de ventilation permettant de créer une surpression dans les locaux par rapport à l'espace de circulation.

7.6 Documentation du dimensionnement

Le dimensionnement de la ventilation, y compris son équipement et son mode prévu de fonctionnement, doit être documenté de manière à en assurer la traçabilité. Cette documentation comprendra en particulier les données de base utilisées et les méthodes de calcul appliquées. Le fonctionnement de l'installation en cas d'exploitation normale et en cas de sinistre doit être décrit de manière exhaustive.

8 ÉQUIPEMENT

8.1 Généralités

L'équipement des tunnels routiers doit répondre à l'état actuel de la technique [17] [18] et aux exigences usuelles de l'OFROU [2] [11] [12] [13]. Par ailleurs, il y a lieu de s'assurer des points suivants :

- bonne accessibilité pour l'entretien et la maintenance ;
- composants résistants à la corrosion, respectivement protection des composants contre la corrosion ;
- disponibilité des pièces de rechange.

Les exigences minimales énumérées ci-après sont applicables. L'annexe V p.48 énumère d'autres indications sur l'équipement sous forme d'une liste de contrôle.

8.2 Instruments de mesure et équipement de détection

8.2.1 Exploitation normale

8.2.1.1 Généralités

En exploitation normale, la mise en fonction de la ventilation est déterminée en règle générale par les paramètres suivants :

- opacité ;
- CO ;
- direction et vitesse de l'air dans l'espace de circulation.

De plus, il peut être opportun d'inclure dans le pilotage de la ventilation les données du trafic avant et dans le tunnel ou des valeurs empiriques décrivant son déroulement.

8.2.1.2 Mesure d'opacité (voir aussi §8.2.2)

Les tunnels dotés d'une ventilation mécanique seront équipés d'instruments de mesure d'opacité. On prévoira au moins deux appareils par tunnel.

8.2.1.3 Mesure du CO

Si le calcul des besoins en air frais l'exige, la concentration de CO dans l'espace de circulation doit être surveillée en permanence et intégrée dans la régulation de la ventilation. Si une mesure de CO est nécessaire, deux appareils au moins seront prévus par tunnel.

8.2.1.4 Mesure de l'écoulement d'air (voir aussi §8.2.2)

Associée aux autres valeurs mesurées, la mesure du flux d'air dans l'espace de circulation sert au pilotage du système de ventilation et au contrôle de son efficacité.

Dans chaque tunnel avec ventilation mécanique, on mesurera la direction du flux d'air et le débit volumique ainsi que la vitesse moyenne d'écoulement dans l'espace de circulation, cela au moins dans une section de celui-ci pour chaque secteur de ventilation.

8.2.2 Cas de sinistre

8.2.2.1 Détection

Les tunnels dotés d'une ventilation mécanique doivent être équipés d'un système de détection d'accident et d'incendie. La distance entre les appareils d'enregistrement de fumée froide ne doit pas excéder 300 m. Sont déterminantes les prescriptions figurant dans la directive de l'OFROU relative à la détection d'incendie [11].

A priori, et dans la mesure du possible, tous les capteurs installés dans un tunnel, y compris l'installation vidéo (voir la directive OFROU [12] sur la vidéosurveillance du trafic), doivent être utilisés dans une mesure judicieuse pour la détection des sinistres.

8.2.2.2 Mesure de l'écoulement d'air

Conformément aux exigences des paragraphes 7.2.3.3 et 7.2.4.2, il faut inclure les mesures de la vitesse de l'air dans le dispositif de commande afin de pouvoir moduler l'écoulement de l'air dans l'espace de circulation en cas de sinistre. La vitesse d'écoulement appliquée à cet effet doit être soumise à un contrôle de plausibilité au moyen de mesures effectuées en trois endroits.

8.2.3 Exigences

8.2.3.1 Exigences minimales posées au domaine et à la précision des mesures

Tous les instruments doivent être conçus pour être utilisés dans les tunnels routiers, et répondre aux exigences minimales suivantes :

Grandeur mesurée	Domaine de mesure	Précision de la mesure
Vitesse de l'écoulement d'air - espace de circulation - canaux, puits	-12 à +12 m/s selon la disposition	± 0.1 m/s ± 1 % du résultat
Opacité Exploitation normale	0 à 0.015 m^{-1}	$\pm 0.0005 \text{ m}^{-1}$
CO	0 à 250 ppm	0 à 60 ppm : ± 5 ppm 60 à 250 ppm : ± 15 ppm

Fig. 27 : exigences minimales posées aux instruments de mesure.

8.2.3.2 Vitesse et lieu de détection

La détection rapide d'un sinistre (voir [11]) est déterminante pour l'efficacité de l'installation de ventilation en place. De plus, pour les systèmes dotés de clapets de ventilation télécommandés, la détermination de l'endroit du sinistre est capitale pour l'exploitation correcte de la ventilation.

8.2.3.3 Périodes déterminantes pour le calcul des moyennes

Les valeurs cibles des périodes maximales pour le calcul des moyennes dans des systèmes de mesure utilisés pour détecter des sinistres devraient être de 10 s. Pour le pilotage des systèmes en exploitation normale, il est judicieux d'utiliser des données de mesure pondérées sur de plus longues périodes.

8.3 Résistance à la température

8.3.1 Ventilateurs d'extraction

Le fonctionnement des ventilateurs d'extraction des fumées d'incendie doit être garanti pour une température de 250°C pendant 120 minutes. Pour le cas particulier dans lequel les ventilateurs extraient la totalité de la masse d'air de l'espace de circulation par une seule ouverture, et lorsque la distance entre le lieu possible de l'incendie et les ventilateurs est inférieure à 50 m, le fonctionnement du dispositif d'extraction doit être garanti pour une température de 400°C pendant 120 minutes. Il y a lieu de s'assurer que les autres installations (p.ex. dans l'espace des ventilateurs) continuent à fonctionner dans les conditions de chaleur générées.

8.3.2 Ventilateurs de jet

Le fonctionnement des ventilateurs de jet doit être garanti pour une température de 250°C pendant 120 minutes.

8.3.3 Clapets d'évacuation

Le fonctionnement des clapets de ventilation télécommandés, y compris leurs moteurs, câblages, etc., doit être garanti pour une température de 250°C pendant 120 minutes.

9 CHEMINS DE FUITE

9.1 Généralités

Lors d'un sinistre, l'auto-sauvetage des usagers est la priorité principale. Les chemins de fuite guident les usagers se trouvant à l'endroit du sinistre vers un lieu sûr. Le but premier du système de ventilation est de maintenir les chemins de fuite exempt de gaz nocif et de fumée.

Pour la conception, le dimensionnement et la signalisation des chemins de fuite, il y a lieu d'observer les normes SIA 197 [17] et 197/2 [18], le rapport du canton des Grisons "*Belüftung von Sicherheits- und Querstollen der Strassentunnel*" [14] et la directive de l'OFROU "*Signalisation des dispositifs de sécurité dans les tunnels*" [13].

Les paragraphes 9.2 et 9.3 contiennent quelques remarques et précisions sur la technique de ventilation exposée dans la documentation précitée.

9.2 Tunnel comportant deux tubes parallèles

Dans le cas des tunnels constitués de deux tubes parallèles à trafic unidirectionnel, on observera les principes suivants :

- 1) Le chemin de fuite est constitué par le deuxième tube.
- 2) Les liaisons transversales de plus de 5 m de long doivent être équipées de deux portes. Le passage pour les usagers du tunnel doit être possible en tout temps. Un verrouillage de type sas n'est pas autorisé pour ces portes. La sortie donnant sur la chaussée adjacente doit être signalée en tant que telle et, le cas échéant, sécurisée. Pour éviter un court-circuit dans les flux d'air entre les deux tubes, les portes doivent être maintenues fermées en régime d'exploitation normale.
- 3) Le tube adjacent et les galeries transversales doivent être préservés des gaz en cas d'incendie. Dans la mesure du possible, on créera pour ce faire une surpression dans le tube adjacent. Le régime de ventilation nécessaire à cet effet sera enclenché par une alarme-incendie.

9.3 Tunnels à un tube

Dans le cas des tunnels bidirectionnels et des tunnels unidirectionnels sans second tube parallèle, on appliquera les principes suivants :

- 1) Des chemins de fuite longitudinaux au-dessus de l'espace de circulation ne sont pas admissibles. Les locaux borgnes accessibles uniquement depuis l'espace de circulation ne remplacent pas les chemins de fuite.
- 2) Des chemins de fuite derrière les sorties de secours doivent être maintenus exempts d'effluents gazeux en cas de sinistre. En règle générale, une surpression par rapport à l'espace de circulation doit y être maintenue en permanence (voir [14]). Le régime de ventilation nécessaire en cas de sinistre est enclenché par une alarme.

10 VÉRIFICATIONS PARTICULIÈRES

10.1 Exigences particulières posées aux composants de l'installation

La ventilation est un système d'importance majeure pour la sécurité des usagers des tunnels. Il y a lieu d'utiliser des composants de haute qualité, simples, fiables et garantissant une sécurité d'exploitation élevée. Les éléments induisant un risque élevé en cas de dysfonctionnement doivent être identifiés avec soin; ils sont à éviter ou à implanter de manière redondante. Les exigences relatives à la redondance sont exposées au §7.2.7.

Une haute disponibilité et un faible taux de panne, sont les critères déterminant dans le choix des composants électriques et électroniques du système de ventilation. Le fonctionnement de chacun des éléments de la ventilation doit être périodiquement vérifié ; ces contrôles doivent être automatisés autant que possible. Les tests périodiques et les résultats attestant du bon fonctionnement des composants de l'installation doivent être enregistrés.

10.2 Mise en service de l'installation

Lors de la mise en service, des tests exhaustifs de tous les composants de même qu'un contrôle de toutes les fonctionnalités doivent être exécutés en présence des personnes chargées de l'exploitation ; le tout est à consigner dans un procès-verbal. Les futurs exploitants bénéficieront d'une formation appropriée, fondée sur des cas concrets. On doit exiger de ces personnes la maîtrise de la gestion de l'installation, que ce soit en mode automatique, manuel ou en test de composants.

10.3 Examen de la conception générale

En cas de modifications conséquentes, il faut réexaminer le système de ventilation dans son ensemble. Ces modifications peuvent être, entre autres : l'instauration de nouveaux modes de fonctionnement de la ventilation non prévus lors de son dimensionnement, des changements significatifs des données concernant le trafic et l'acquisition de nouvelles connaissances générales suite à des sinistres.

11 CONDITIONS D'EXPLOITATION

11.1 Qualité de l'air dans l'espace de circulation

La ventilation est dimensionnée en fonction des valeurs caractéristiques de la concentration de CO et de l'opacité indiquées à la figure 16. Pour le pilotage de l'installation, les valeurs d'enclenchement seront fixées de manière à ce que les valeurs de dimensionnement soient respectées en moyenne dans tout le tunnel pour le CO et en chaque lieu du tunnel pour l'opacité.

Lorsque les valeurs indiquées à la figure 28 sont dépassées pendant plus de 3 minutes en un endroit quelconque de l'espace de circulation, il faut bloquer immédiatement l'accès au tube concerné.

Concentration de CO [ppm]	Opacité [1/m]
200	0.012

Fig. 28 : valeurs limites de la qualité de l'air dans l'espace de circulation, déterminantes pour la fermeture du tunnel.

Si une mesure de l'opacité dépasse la valeur d'alarme définie pour détecter des fumées, la ventilation est automatiquement enclenchée en mode sinistre.

11.2 Pilotage

11.2.1 Système de mesure et de détection

Les données relatives à l'instrumentation figurent au chapitre 8.

11.2.2 Ventilateurs de jet

Les ventilateurs de jet, qui, en cas de sinistre, fonctionnent pour maintenir un certain écoulement longitudinal de l'air, doivent être réglés automatiquement pendant la durée du sinistre. A cet effet, des mesures fiables de la vitesse longitudinale de l'air dans l'espace de circulation doivent être disponibles.

11.2.3 Débits d'air vicié

Le débit d'air extrait, équivalant à $3 \text{ m/s} \times \text{la section de l'espace de circulation en } m^2$, comme indiqué au §7.2.4, détermine le flux minimal d'air à extraire dans le secteur du sinistre. Si des capacités plus grandes sont disponibles, il y a lieu de les exploiter.

11.2.4 Apport d'air frais en cas de sinistre

Il faut couper ou réduire l'apport d'air frais dans la zone du sinistre, et augmenter le débit d'air extrait de la valeur correspondant à l'apport d'air frais dans la zone de l'extraction des fumées (voir §7.2.4). Dans les secteurs voisins, il peut être opportun d'amener de grands volumes d'air frais, et de synchroniser cet apport et l'extraction d'air vicié.

11.2.5 Clapets de ventilation télécommandés en exploitation normale

Au besoin, les clapets de ventilation télécommandés seront également utilisés pour l'exploitation normale de la ventilation.

11.2.6 Clapets de ventilation télécommandés ainsi que ventilateurs d'extraction et d'apport d'air en cas d'incendie

En cas de sinistre, les clapets de ventilation télécommandés ainsi que les ventilateurs d'extraction et d'amenée d'air doivent être pilotés automatiquement en fonction de la situation régnant à l'endroit du sinistre, selon des scénarios préalablement définis. Une inversion automatique des clapets n'est généralement pas judicieuse. Dans le cas de plusieurs alertes successives, il faut conserver en premier lieu le réglage automatique établi en fonction de la première alarme. L'inversion manuelle des clapets et des ventilateurs doit être possible.

La détection automatique de sinistres doit permettre de préparer le plus rapidement possible l'installation au déclenchement éventuel d'un incendie (réglage des clapets).

11.3 Traçabilité de sinistres particuliers

Toutes les données de mesures et tous les enregistrements vidéo significatifs pour la ventilation doivent être automatiquement archivés après chaque alarme-incendie.

S'agissant de l'examen du sinistre et de l'analyse du fonctionnement de la ventilation, chaque incendie doit être documenté de manière détaillée et complète dans un rapport à l'attention de l'OFROU.

11.4 Gestion du trafic

Les bouchons dans un tunnel en exploitation normale doivent être évités au moyen d'un système de gestion du trafic.

En cas de sinistre, il faut empêcher les entrées dans le tunnel à une distance adéquate de tous les portails, et bloquer immédiatement la circulation dans le tunnel en direction de l'endroit du sinistre. La sortie des véhicules ayant déjà passé l'endroit du sinistre doit être assurée dans le tube où se situe celui-ci. Dans le tube adjacent, les véhicules qui ont déjà passé le portail d'entrée doivent pouvoir continuer leur progression.

11.5 Alimentation sans coupure (*UPS*)

L'énergie électrique des composants déterminants pour la sécurité, tels que les systèmes de mesure et de détection, ainsi que le dispositif de commande, doit être assurée par une alimentation sans coupure (*UPS*).

Les ventilateurs axiaux, les ventilateurs de jet ainsi que les ventilateurs servant à maintenir une surpression dans les chemins de fuite doivent être alimentés par deux réseaux indépendants. Leur exploitation via une alimentation sans coupure (*UPS*) n'est pas admise.

12 TRAVAUX DE MAINTENANCE ET D'ENTRETIEN

12.1 Qualité de l'air dans l'espace de circulation

Durant les travaux de maintenance et d'entretien dans un tunnel, la qualité de l'air dans l'espace de circulation doit être conforme aux valeurs prescrites par la SUVA¹. Il n'y a pas lieu de prévoir le dimensionnement et l'installation d'un système de ventilation uniquement pour les travaux de maintenance et d'entretien. Lorsque aucun détecteur de CO n'est installé, c'est l'expérience qui dicte le mode de fonctionnement de la ventilation durant les travaux de maintenance et d'entretien. Lorsque des travaux types sont effectués pour la première fois, il est recommandé d'utiliser des détecteurs mobiles de CO.

12.2 Étendue des travaux

Les travaux de maintenance et d'entretien usuels doivent être exécutés et documentés conformément aux dispositions figurant dans les manuels d'exploitation des fabricants. Les valeurs empiriques s'en écartant doivent être documentées en référence à ces manuels. Afin de s'assurer de leur fonctionnalité, on vérifiera à intervalles adéquats, conformément au §10.1, tous les composants qui se révèlent essentiels sur le plan de la technique de sécurité. Une attention particulière sera portée aux composants de la ventilation qui ne sont pas utilisés en exploitation normale.

Les composants essentiels sont notamment :

- Appareillage de détection et de mesure
 - Installation de détection incendie
 - Mesure de température / capteurs de température
 - Mesure de l'opacité
 - Mesure du CO
 - Mesure de l'écoulement d'air dans l'espace de circulation
- Ventilateurs d'extraction
- Ventilateurs de jet
- Clapets de ventilation télécommandés
- Clapets de fermeture et de dérivation (by-pass)
- Commandes/régulations
- Portes de sorties de secours

Lors des vérifications, il y a lieu de prendre également en compte les messages d'état relatifs aux composants (position des clapets, état des ventilateurs, etc.).

¹ SUVA : caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents.

ANNEXES

I	Abréviations, unités et glossaire.....	35
I.1	Abréviations.....	35
I.2	Unités	36
I.3	Glossaire	36
II	Valeurs indicatives destinées aux prévisions de trafic	38
II.1	Évolution du trafic.....	38
II.2	Trafic horaire déterminant	38
II.3	Fréquence des embouteillages	38
III	Calcul des émissions.....	39
III.1	Bases.....	39
III.2	Émissions des voitures de tourisme.....	39
III.3	Émissions des poids lourds.....	42
III.4	Évolution des émissions de base en fonction du temps	45
IV	Ventilateurs de jet	46
IV.1	Généralités	46
IV.2	Caractéristiques des ventilateurs	46
IV.3	Disposition.....	46
IV.4	Exploitation normale.....	46
IV.5	Exploitation en cas de sinistre.....	47
V	Remarques relatives aux composants (liste de contrôle)	48
VI	Données servant à optimiser le dimensionnement.....	50
VI.1	Généralités	50
VI.2	Amortissement du capital investi.....	50
VI.3	Charges moyennes	50
VI.4	Durée d'utilisation ou période considérée ...	51
VI.5	Intérêt du capital et renchérissement.....	52
VI.6	Prix de l'énergie.....	52
VI.7	Données nécessaires.....	52
VII	Précisions du 31 juillet 2006	53
VII.1	Domaine d'application	53
VII.2	Précisions.....	54
VII.3	Nomogramme pour l'estimation des pertes de pression.....	56
	Bibliographie.....	57

I ABRÉVIATIONS, UNITÉS ET GLOSSAIRE

I.1 Abréviations

Les abréviations utilisées uniquement dans les annexes sont définies dans ces annexes.

Abréviations		Unité	Signification
français - anglais	allemand		
alt	H	m	altitude
A_{Tunnel}	A_{Tunnel}	m ²	section transversale de l'espace de circulation d'un tunnel
$C_{\text{lim,CO}}$	$C_{\text{lim,CO}}$	ppm	valeur de dimensionnement des émissions de CO
CO	CO	-	monoxyde de carbone
$c_w A_{\text{front}}$	$c_w A_{\text{Front}}$	m ²	surface de résistance d'un véhicule
Décl	LN	-	déclivité; en trafic unidirectionnel, les valeurs positives désignent une montée, les valeurs négatives une descente
$Décl_{\text{incendie}}$	LN_{Brand}	-	pente moyenne du segment L_{incendie}
D_h	D_h	m	diamètre hydraulique $D_h = 4 \cdot \text{section} / \text{périmètre}$
E_{CO}	E_{CO}	m ³ /s	émissions totales de CO
EIE	UVB	-	Étude d'impact sur l'environnement
E_{op}	E_T	m ² /s	émissions totales de matières opacifiantes
$e_{\text{PL,CO}}$	$e_{\text{LW,CO}}$	m ³ /(h,vhc)	émissions spécifiques de CO d'un camion
$e_{\text{PL,op}}$	$e_{\text{LW,T}}$	m ² /(h,vhc)	émissions spécifiques de matières opacifiantes d'un camion
$e_{\text{VT,CO}}$	$e_{\text{PW,CO}}$	m ³ /(h,vhc)	émissions spécifiques de CO d'une VT
$e_{\text{VT,op}}$	$e_{\text{PW,T}}$	m ² /(h,vhc)	émissions spécifiques de matières opacifiantes d'une VT
g	g	m/s ²	accélération de la pesanteur = 9.81 m/s ²
$k_{\text{lim,op}}$	$k_{\text{lim,T}}$	1/m	valeur de dimensionnement de l'opacité en tunnel
L_{incendie}	L_{Brand}	m	segment du tunnel dans la zone d'incendie, à température élevée
L_{Tunnel}	L_{Tunnel}	m	longueur du tunnel
NO ₂	NO ₂	-	dioxyde d'azote
NO _x	NO _x	-	oxydes d'azote
OFEFP	BUWAL	-	Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
OFROU	ASTRA	-	Office fédéral des routes
OPair	LRV	-	ordonnance sur la protection de l'air
OPbruit	LSV	-	ordonnance sur la protection contre le bruit
p_{atm}	p_{atm}	Pa	pression atmosphérique
PL	LW	-	poids lourd
Q_{ae}	Q_{ABL}	m ³ /s	débit volumique de l'air extrait (air vicié) par les clapets
$Q_{\text{ae,min}}$	$Q_{\text{ABL,min}}$	m ³ /s	débit volumique minimal de l'air extrait (air vicié) par les clapets
Q_{af}	Q_{FL}	m ³ /s	débit volumique d'air frais
$Q_{\text{af,CO}}$	$Q_{\text{FL,CO}}$	m ³ /s	débit d'air frais requis pour le CO
$Q_{\text{af,min}}$	$Q_{\text{FL,min}}$	m ³ /s	débit d'air frais minimal nécessaire
$Q_{\text{af,op}}$	$Q_{\text{FL,T}}$	m ³ /s	débit d'air frais nécessaire pour l'opacité
Q_{ap}	Q_{ZUL}	m ³ /s	débit volumique de l'air d'apport (air frais)
Q_{fuites}	Q_{Leck}	m ³ /s	pertes à travers les clapets de ventilation fermés et dans les gaines de ventilation
$Q_{\text{ventilateur}}$	$Q_{\text{Ventilator}}$	m ³ /s	débit volumique du ventilateur d'extraction
R_{air}	R_L	J/(kg·K)	constante des gaz pour l'air = 286,7 J/(kg·K)
T	T	K	température
T_e	T_a	K	température de référence de l'air extérieur
THD	MSV	vhc/h	trafic horaire déterminant
T_i	T_i	K	température moyenne dans l'espace de circulation du tunnel, avant le sinistre
TJM	DTV	vhc/24h	trafic journalier moyen (somme des deux directions)
TB	GV	-	trafic bidirectionnel
TU 1	RV 1	-	trafic unidirectionnel avec faible fréquence de bouchons
TU 2	RV 2	-	trafic unidirectionnel avec forte fréquence de bouchons
UPS	USV	-	<i>Uninterruptible Power Supply</i> Alimentation Sans Coupure (ASC)

Abréviation		Unité	Signification
français - anglais	allemand		
UVT	PWE	-	unité-voiture
V_{air}	V_L	m/s	vitesse de l'air dans l'espace de circulation
$V_{PL,max}$	$V_{LW,max}$	km/h	vitesse limite des poids lourds en fonction de la pente
V_{sig}	V_{sig}	km/h	vitesse maximale signalée
VT	PW	-	voiture de tourisme
V_{vhc}	V_{Fz}	km/h	vitesse des véhicules
V_{VT}	V_{PW}	km/h	vitesse des VT
$\Delta p_{frottement}$	$\Delta p_{Reibung}$	Pa	perte de pression due au frottement de l'air contre les parois du tunnel
$\Delta p_{incendie}$	Δp_{Brand}	Pa	pression verticale ascendante due à l'incendie
Δp_{mt}	Δp_{mt}	Pa	différence de pression météorologique / thermique
Δp_{nat}	Δp_{nat}	Pa	pression verticale ascendante ou descendante, due à une différence naturelle de température
$\Delta p_{néc}$	Δp_{erf}	Pa	pression nécessaire, à fournir par les ventilateurs de jet
Δp_{trafic}	$\Delta p_{Verkehr}$	Pa	pression engendrée par le trafic
Δp_{vhc}	Δp_{Fz}	Pa	pression engendrée par un véhicule
$\Delta T_{incendie}$	ΔT_{Brand}	K	élévation moyenne de la température due à l'incendie dans le segment $L_{incendie}$
λ	λ	-	coefficient de pertes par frottement
ρ_e	ρ_a	kg/m ³	densité de l'air extérieur
ρ_i	ρ_i	kg/m ³	densité de l'air dans le tunnel
$\rho_{incendie}$	ρ_{Brand}	kg/m ³	densité de l'air dans la zone de l'incendie
ζ_e	ζ_e	-	coefficient de pertes de l'air entrant dans le tunnel (air aspiré)
ζ_s	ζ_a	-	coefficient de perte de l'air sortant du tunnel (air expiré)

I.2 Unités

Unité	Signification
N = kg m/s ²	force, poussée
Pa = N/m ²	pression
m ² /s	émissions de matières opacifiantes, viscosité de l'air
ppm, mg/m ³ , µg/m ³	concentration
1/m	opacité
m ³ /s	débit volumique
kg/m ³	densité
J = W·s	capacité calorifique, travail, énergie
W = J/s	puissance
K	différence de température ou température absolue
°C	température

I.3 Glossaire

Notion	Signification
Abrasion <i>Abrieb</i>	Abrasion des pneus, du revêtement de la chaussée, des freins et des embrayages.
Air extérieur <i>Aussenluft</i>	Air présent dans les environs d'un tunnel. En général, la pollution de l'air extérieur par le CO et les matières opacifiantes est négligeable dans l'optique de la ventilation d'un tunnel.
Air extrait, air vicié <i>Abluft</i>	Air chargé des émissions produites dans le tunnel.
Air frais <i>Frischluff</i>	Air extérieur nécessaire au maintien, dans un tronçon de tunnel donné, des limites de concentration de CO et de visibilité requises. L'air frais parvenant dans le tronçon est de l'air forcé, de l'air extérieur (arrivant par le portail) ou de l'air déjà partiellement vicié.
Air frais (besoin d') <i>Frischluffbedarf</i>	Débit volumique d'air frais nécessaire pour le maintien de la qualité de l'air dans le tunnel.

Notion	Signification
Apport d'air frais, air entrant <i>Zuluft</i>	Air extérieur forcé de manière contrôlée à l'intérieur du tunnel.
Auto-sauvetage (phase d') <i>Selbstrettungsphase</i>	Durée entre le déclenchement du sinistre et l'arrivée des équipes de secours.
Clapet de ventilation <i>Abluftklape</i>	Clapet télécommandé servant à extraire de l'espace de circulation l'air vicié et les fumées dégagées par un incendie.
Détection (temps de) <i>Detektionszeit</i>	Temps entre le déclenchement du sinistre et le moment où l'alarme est donnée.
Distance de fuite <i>Fluchtwegdistanz</i>	Distance séparant le lieu de l'accident de l'endroit sûr le plus proche, compte tenu d'une situation défavorable à l'endroit du sinistre; p.ex. distance entre deux galeries transversales.
Émissions (les) <i>Emissionen</i>	Rejets liés aux transformations énergétiques.
Espace de circulation <i>Fahrraum</i>	Espace du tunnel limité par la chaussée, le plafond et les parois.
Essais EUREKA <i>EUREKA-Versuche</i>	Série d'essais visant à déterminer le comportement des véhicules en feu [7].
Galerie transversale <i>Querschlag</i>	Liaison pour piétons et parfois carrossable entre deux tubes d'un tunnel.
Immission <i>Immission</i>	Une fois que le transport, la dispersion et les transformations ont été effectuées, la concentration en polluant entrant en contact avec un récepteur est appelée immission. Les immissions traduisent les effets des polluants sur les hommes, les animaux et les plantes.
Incendie (durée d') <i>Branddauer</i>	Intervalle entre le déclenchement et la fin de l'incendie.
Incendie (durée de développement de l') <i>Brandentwicklungszeit</i>	Intervalle entre le déclenchement et l'intensité maximale de l'incendie.
Incendie (puissance nominale d') <i>Brandleistung nominal</i>	Désignation de l'incendie de dimensionnement.
Incident <i>Ereignisfall</i>	Perturbation dans le flux de trafic, accompagnée d'une mise en danger des usagers de la route.
Matière opacifiante <i>Sichttrübe</i>	Somme de toutes les matières provoquant une réduction de la visibilité.
Opacité <i>Sichttrübung</i>	Altération de la visibilité par de fines particules ou par de la fumée.
Poids lourd <i>Lastwagen</i>	Désignation du type moyen de véhicule de la catégorie des poids lourds marchandises, pour le calcul des émissions.
Recirculation <i>Rezirkulation</i>	Remise en circulation de l'air pollué dans le tube adjacent du tunnel.
Resuspension <i>Aufwirbelung</i>	Part de la charge particulaire de l'air produite par des tourbillons soulevant les dépôts de particules.
Section du tunnel <i>Tunnelquerschnitt</i>	Section aérodynamique totale de l'espace de circulation.
Trafic horaire déterminant (THD) <i>Massgeblicher, stündlicher Verkehr (MSV)</i>	Trafic horaire dans une section, dépassé pendant 30 heures dans l'année.
Trafic journalier moyen <i>Durchschnittlicher, täglicher Verkehr</i>	Nombre de véhicules à moteur empruntant un tronçon routier pendant une année, divisé par 365 jours (TJM).
Tronçon de tunnel <i>Tunnelabschnitt</i>	Tronçon longitudinal de tunnel à dimension géométrique constante.
Ventilation longitudinale <i>Längslüftung</i>	Apport d'air frais dans les tubes d'un tunnel par l'espace de circulation, en général d'un portail à l'autre.
Ventilation naturelle <i>Natürliche Lüftung</i>	Apport d'air frais dans les tubes d'un tunnel sous l'action du trafic et de la différence de pression aux portails.
Ventilation semi-transversale <i>Halbquerlüftung</i>	Ventilation fonctionnant par un apport d'air frais réparti sur la longueur du tunnel au niveau de la chaussée. L'air s'écoule à travers l'espace de circulation (§3.4.3).
Ventilation semi-transversale/-transversale <i>Halbquer-/Querlüftung</i>	Ce système n'est plus autorisé (§3.4.3).
Ventilation transversale <i>Querlüftung</i>	Système de ventilation dans lequel simultanément et sur toute la longueur d'un tunnel de l'air frais est amené et de l'air vicié extrait (§3.4.3).
Vitesse de fuite <i>Fluchtgeschwindigkeit</i>	Vitesse de progression d'une personne fuyant à pied; valeur typique : 5 km/h \approx 1.5 m/s.
Vitesse de l'air <i>Luftgeschwindigkeit</i>	Vitesse de l'écoulement d'air longitudinal dans la section du tunnel.
Voiture de tourisme <i>Personenwagen</i>	Désignation du type moyen de véhicule de la catégorie des voitures de tourisme et de livraison, pour le calcul des émissions.

II VALEURS INDICATIVES DESTINÉES AUX PRÉVISIONS DE TRAFIC

Les données nécessaires concernant le trafic sont décrites aux paragraphes 5.2 et 7.1.1.

Si l'on ne dispose pas de toutes les données concernant le trafic dans les premières phases d'un projet, on peut se servir, exclusivement pour le dimensionnement de la ventilation, des valeurs indicatives présentées dans cette annexe. Pour les phases suivantes, on appliquera obligatoirement des données issues d'études détaillées du trafic.

II.1 Évolution du trafic

Pour évaluer l'évolution du trafic dans son ensemble, on peut appliquer un taux de croissance annuel moyen de 1,5 %. La part des poids lourds au trafic total peut être considérée comme constante.

II.2 Trafic horaire déterminant

Le trafic horaire déterminant (THD) peut être évalué à l'aide du tableau ci-dessous.

Caractère du trafic	Type	Classe	THD en % du TJM
Trafic longue distance	1	classe 1	11
Trafic longue distance avec trafic professionnel	2		
Trafic professionnel	3		
Trafic local	4		
Trafic régional	5	classe 2	14
Trafic de loisirs	6	classe 3	16
Trafic touristique* (complément à [15])	7	classe 4	18

* à partir et à destination de lieux de vacances

Fig. 29 : genres des déplacements en fonction des types et classes selon [15, chiffre 5] et trafic horaire déterminant par genre de déplacement. L'indication du THD repose sur des données de [15] pour les moyennes de la 30^{ème} heure.

La part des poids lourds au THD peut être considérée comme étant égale à 75 % de la part de ces véhicules au TJM.

II.3 Fréquence des embouteillages

Pour les tunnels unidirectionnels, on se fonde sur les prévisions de bouchons, pour faire la distinction entre les situations présentant une fréquence d'embouteillage forte ou faible (§6.1). Les données de la figure 30 ont valeur indicative.

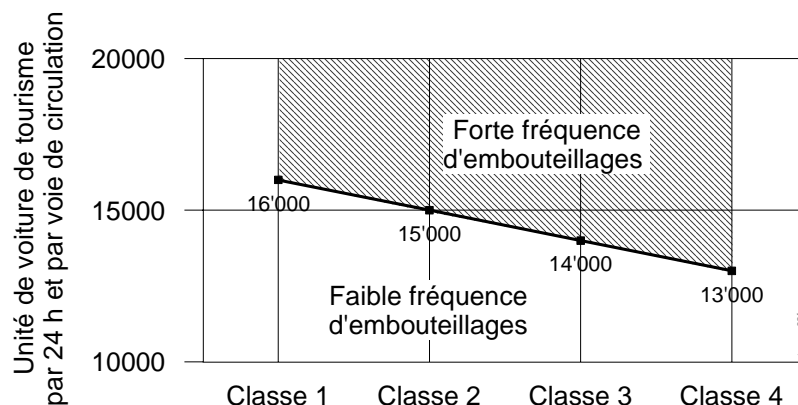


Fig. 30 : tunnels unidirectionnels : fortes et faibles fréquences d'embouteillages selon [14], en l'absence de prévisions. Les UVT se rapportent aux TJM et aux taux moyens de poids lourds. Les classes se rapportent aux genres des déplacements selon la figure 29. La limite entre les deux zones peut être 20 % plus bas si les voies de circulation se rejoignent dans le tunnel ou à proximité. 1 PL \approx 2 UVT.

III CALCUL DES ÉMISSIONS

III.1 Bases

En complément aux paragraphes 7.1.3 et 7.1.4, les pages qui suivent précisent les données de base servant au calcul des émissions moyennes de monoxyde de carbone (CO) et de matières opacifiantes des voitures de tourisme (VT) et des poids lourds (PL). Les valeurs d'émission applicables au dimensionnement des installations de ventilation des tunnels reposent sur les données tirées de l'AIPCR [5] et constituent des moyennes calculées pour un grand nombre de véhicules. Les émissions des véhicules considérés individuellement peuvent s'écarter considérablement de ces moyennes.

Dans le passé, les valeurs d'émission des véhicules immatriculés dans des pays voisins variaient parfois considérablement. Avec les nouvelles normes Euro, ces écarts se combrent peu à peu, si bien que les valeurs indiquées ici peuvent s'appliquer aux trois catégories de véhicules suivantes, indépendamment de leur origine : VT à essence, VT diesel et PL. Ce à quoi il faut être attentif, c'est la proportion des VT à moteur diesel, variable suivant les pays (figure 31).

III.2 Émissions des voitures de tourisme

III.2.1 Équations de base

Les émissions d'une voiture de tourisme moyenne à moteur à essence $e_{VT,E}$ se calculent à l'aide de l'équation suivante :

$$e_{VT,E} = (e_0 \cdot f_t \cdot f_{alt})_{VT,E} + q_{AR,VT} \quad \text{Éq. III-1}$$

Les émissions d'une voiture de tourisme moyenne à moteur diesel $e_{VT,D}$ se calculent à l'aide de l'équation suivante :

$$e_{VT,D} = (e_0 \cdot f_t \cdot f_{alt})_{VT,D} + q_{AR,VT} \quad \text{Éq. III-2}$$

Les émissions d'une voiture de tourisme moyenne e_{VT} s'obtiennent donc par analogie selon l'équation suivante :

$$e_{VT} = (1 - a_{VT,D}) \cdot e_{VT,E} + a_{VT,D} \cdot e_{VT,D} \quad \text{Éq. III-3}$$

Pour le CO, $e_{VT} = e_{VT,CO}$ et pour l'opacité, $e_{VT} = e_{VT,op}$.

e_0 valeur de base des émissions à l'échappement pour chaque substance polluante, en fonction de la vitesse du véhicule et de la déclivité de la route, avec distinction entre VT_E et VT_D , en $m^3CO/(h,vhc)$ resp. $m^2/(h,vhc)$. La valeur de base se rapporte à l'année 2010 et à un trajet accompli à l'altitude zéro.

f_t coefficient de temps par substance polluante, avec distinction entre VT_E et VT_D

f_{alt} coefficient d'altitude par substance polluante, avec distinction entre VT_E et VT_D

$q_{ar,VT}$ émissions de matières opacifiantes dues non pas aux moteurs, mais à l'abrasion et à la resuspension en $m^2/(h,vhc)$

$a_{VT,D}$ part des VT_D au trafic des VT en %

$e_{VT,CO}$ émissions de CO de la VT moyenne en $m^3CO/(h,vhc)$

$e_{VT,op}$ émissions de matières opacifiantes de la VT moyenne en $m^2/(h,vhc)$

En l'absence de données précises sur la part des VT_D dans le projet spécifique, on utilisera les valeurs de la figure 31 (tirées de [16]). Les valeurs pour la Suisse contiennent une proportion moyenne de véhicules étrangers. On adaptera ces valeurs dans les régions proches de la frontière et pour les axes de transit.

Année	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Suisse	6.2	6.9	8.6	16.6	27	34	38	40
Allemagne	18.0	18.3	18.9	27.4	36	42	43	44
Autriche	20.1	36.3	58.1	71.2	77	79	80	80

Fig. 31 : part des VT à moteur diesel $a_{VT,D}$ en % du trafic moyen des VT.

III.2.2 Émissions de CO des VT à moteur à essence

v_{vhc} [km/h]	Déclivité						
	- 6 %	- 4 %	- 2 %	0 %	2 %	4 %	6 %
0	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
5	0.011	0.015	0.020	0.024	0.029	0.034	0.039
10	0.011	0.015	0.019	0.023	0.028	0.032	0.038
20	0.010	0.014	0.017	0.021	0.024	0.031	0.040
30	0.010	0.013	0.017	0.020	0.023	0.032	0.044
40	0.010	0.014	0.017	0.020	0.025	0.037	0.056
50	0.011	0.014	0.018	0.021	0.028	0.045	0.070
60	0.011	0.014	0.018	0.022	0.033	0.070	0.105
70	0.011	0.014	0.018	0.022	0.053	0.112	0.159
80	0.011	0.015	0.020	0.025	0.090	0.161	0.233
90	0.014	0.019	0.026	0.035	0.137	0.240	0.385
100	0.018	0.026	0.038	0.054	0.222	0.397	0.673
110	0.026	0.040	0.060	0.089	0.374	0.707	1.253
120	0.041	0.064	0.100	0.154	0.626	1.060	1.911

Fig. 32 : valeur de base des émissions de monoxyde de carbone e_0 des VT_E en $m^3/(h,vhc)$.

Année	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025
f_t	15.4	6.50	2.67	1.32	1.00	0.81	0.76	0.75

Fig. 33 : coefficient de temps f_t pour les émissions de CO des VT_E .

Altitude [m]	0	400	700	1000	2000	3000
f_{alt}	1.0	1.0	1.0	2.6	11.4	13.0

Fig. 34 : coefficient d'altitude f_{alt} pour les émissions de CO des VT_E .

Pour le CO, $q_{AR,VT} = 0$.

La charge de base en CO dans l'environnement peut être négligée.

III.2.3 Émissions de matières opacifiantes des VT à moteur à essence

Les émissions de matières opacifiantes à l'échappement des VT_E sont négligeables, $e_0 = 0$.

L'apport des matières opacifiantes produites par l'usure et la resuspension, $q_{ar,VT}$, dépend de la vitesse de déplacement. Les valeurs sont identiques pour les VT_E et les VT_D , et restent constantes.

v_{vhc} [km/h]	0	5	10	20	30	40	50
$q_{AR,VT}$ [$m^2/(h,vhc)$]	0	0.45	0.9	1.8	2.7	3.6	4.5
	60	70	80	90	100	110	120
	5.4	6.3	7.2	8.1	9.0	9.9	10.8

Fig. 35 : émissions de matières opacifiantes non dues aux moteurs des VT $q_{AR,VT}$ en $m^2/(h,vhc)$.

III.2.4 Émissions de CO des VT à moteur diesel

V_{vhc} [km/h]	Déclivité						
	- 6 %	- 4 %	- 2 %	0 %	2 %	4 %	6 %
0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
5	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.006	0.007
10	0.005	0.006	0.006	0.006	0.007	0.008	0.010
20	0.008	0.008	0.008	0.009	0.010	0.012	0.014
30	0.010	0.010	0.010	0.011	0.013	0.014	0.018
40	0.010	0.010	0.011	0.011	0.013	0.015	0.018
50	0.010	0.010	0.011	0.011	0.013	0.015	0.019
60	0.009	0.009	0.010	0.010	0.012	0.014	0.019
70	0.009	0.009	0.009	0.010	0.011	0.014	0.020
80	0.009	0.009	0.009	0.010	0.011	0.015	0.022
90	0.010	0.010	0.011	0.011	0.013	0.018	0.026
100	0.012	0.012	0.013	0.013	0.015	0.022	0.030
110	0.014	0.014	0.015	0.016	0.018	0.026	0.036
120	0.017	0.017	0.018	0.019	0.022	0.031	0.043

Fig. 36 : valeur de base des émissions de monoxyde de carbone e_0 des VT_D en $m^3/(h,vhc)$.

Année	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025
f_t	3.47	2.38	1.60	1.18	1.00	0.94	0.92	0.92

Fig. 37 : coefficient de temps f_t pour les émissions de CO des VT_D .

Altitude [m]	0	400	700	1000	2000	3000
f_{alt}	1.00	1.00	1.00	1.21	1.50	1.81

Fig. 38 : coefficient d'altitude f_{alt} pour les émissions de CO des VT_D .

Pour le CO, $q_{AR,VT} = 0$.

La charge de base en CO dans l'environnement peut être négligée.

III.2.5 Émissions de matières opacifiantes des VT à moteur diesel

V_{vhc} [km/h]	Déclivité						
	- 6 %	- 4 %	- 2 %	0 %	2 %	4 %	6 %
0	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
5	1.34	1.37	1.41	1.43	1.56	1.74	2.04
10	1.53	1.57	1.61	1.65	1.91	2.27	2.88
20	1.88	1.95	2.03	2.11	2.59	3.31	4.54
30	2.42	2.54	2.66	2.80	3.56	4.78	6.85
40	3.32	3.50	3.69	3.90	5.12	7.20	10.59
50	4.18	4.45	4.73	5.06	6.77	10.39	15.56
60	4.79	5.24	5.65	6.13	8.34	11.44	17.29
70	4.32	4.80	5.25	5.78	7.94	9.99	15.24
80	3.31	3.78	4.27	4.84	6.75	9.64	14.87
90	4.79	5.47	6.18	7.01	9.86	14.62	22.69
100	7.16	8.19	9.25	10.49	14.84	22.05	34.32
110	9.96	11.39	12.86	14.58	20.72	31.37	48.87
120	12.99	14.86	16.79	19.01	27.11	41.02	63.90

Fig. 39 : émissions de base de matières opacifiantes e_0 à l'échappement des VT_D en $m^2/(h,vhc)$.

Année	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025
f_t	7.50	5.09	3.23	1.94	1.00	0.60	0.48	0.47

Fig. 40 : coefficient de temps f_t pour les émissions de base de matières opacifiantes à l'échappement des VT_D.

Altitude [m]	0	400	700	1000	2000	3000
f_{alt}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.50

Fig. 41 : coefficient d'altitude f_{alt} pour les émissions de matières opacifiantes des VT_D.

L'apport des matières opacifiantes produites par l'abrasion et la resuspension, $q_{AR,VT}$, est identique pour les VT diesel et à essence. Les valeurs sont tirées de la figure 35.

III.3 Émissions des poids lourds

III.3.1 Équations de base

Les émissions e_{PL} d'un poids lourd se calculent selon la formule suivante:

$$e_{PL} = e_0 \cdot f_t \cdot f_{alt} \cdot f_m + q_{AR,PL} \quad \text{Éq. III-4}$$

Pour le CO, $e_{PL} = e_{PL,CO}$ et pour les matières opacifiantes, $e_{PL} = e_{PL,op}$.

e_0 valeur de base des émissions à l'échappement pour chaque substance polluante, en fonction de la vitesse du véhicule et de la déclivité de la route, en $m^3CO/(h,vhc)$ resp. $m^2/(h,vhc)$. La valeur de base se rapporte à l'année 2010, à un trajet accompli à l'altitude zéro avec un véhicule de 10 t.

f_t coefficient de temps par substance polluante

f_{alt} coefficient d'altitude par substance polluante

f_m facteur de masse par substance polluante

$q_{AR,PL}$ émissions de matières opacifiantes dues non pas aux moteurs, mais à l'abrasion et à la resuspension en $m^2/(h,vhc)$

$e_{PL,CO}$ émissions de CO d'un PL en $m^3CO/(h,vhc)$

$e_{PL,op}$ émissions de matières opacifiantes d'un PL en $m^2/(h,vhc)$

III.3.2 Émissions de CO des PL

v_{vhc} [km/h]	Déclivité						
	- 6 %	- 4 %	- 2 %	0 %	2 %	4 %	6 %
0	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
5	0.010	0.011	0.011	0.013	0.013	0.015	0.016
10	0.011	0.012	0.012	0.014	0.015	0.017	0.020
20	0.014	0.014	0.014	0.016	0.019	0.024	0.029
30	0.015	0.016	0.017	0.019	0.024	0.030	0.038
40	0.016	0.017	0.018	0.021	0.028	0.035	0.045
50	0.016	0.018	0.020	0.023	0.031	0.040	0.053
60	0.017	0.019	0.021	0.025	0.035	0.046	0.061
70	0.017	0.021	0.023	0.027	0.039	0.052	0.061
80		0.024	0.026	0.031	0.046	0.052	
90		0.024	0.032	0.038	0.057		
100			0.040	0.047	0.057		

Fig. 42 : émissions de base de CO e_0 des PL en $m^3/(h,vhc)$.

Année	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025
f_t	8.68	6.15	3.67	1.93	1.00	0.79	0.74	0.73

Fig. 43 : coefficient de temps f_t pour les émissions de CO des PL.

Altitude [m]	0	400	700	1000	2000	3000
f_{alt}	1.00	1.00	1.00	1.35	2.75	4.00

Fig. 44 : coefficient d'altitude f_{alt} pour les émissions de CO des PL.

Pour le CO, $q_{AR,PL} = 0$.

La charge de base en CO dans l'environnement peut être négligée.

Masse [t]	v_{vhc} [km/h]											
	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
20	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
30	1.4	1.7	2.1	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.8	2.8

Fig. 45 : coefficient de masse f_M pour les émissions de CO des PL.

III.3.3 Émissions de matières opacifiantes des PL

v_{vhc} [km/h]	Déclivité						
	- 6 %	- 4 %	- 2 %	0 %	2 %	4 %	6 %
0	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
5	5.8	5.8	5.8	7.2	7.7	8.4	9.2
10	6.2	6.3	6.3	7.7	8.8	10.1	11.7
20	7.1	7.2	7.4	9.1	11.1	13.7	16.8
30	7.8	8.2	8.6	10.6	13.6	17.2	21.6
40	8.2	8.9	9.6	12.2	15.9	20.7	26.4
50	8.6	9.5	10.5	13.4	18.2	24.2	31.2
60	8.9	10.2	11.4	14.9	20.8	28.1	36.6
70	8.9	11.2	12.5	16.3	23.4	32.1	36.6
80		12.8	14.4	18.6	27.7	32.1	
90		12.8	16.9	21.6	33.7	32.1	
100			20.3	25.1	33.7		

Fig. 46 : émissions de base de matières opacifiantes e_0 à l'échappement des PL en $m^2/(h,vhc)$.

Année	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025
f_t	9.74	7.60	4.46	2.31	1.00	0.63	0.53	0.51

Fig. 47 : coefficient de temps f_t pour les émissions de base de matières opacifiantes à l'échappement des PL.

Altitude [m]	0	400	700	1000	2000	3000
f_{alt}	1.00	1.00	1.00	1.12	1.69	2.26

Fig. 48 : coefficient d'altitude f_{alt} pour les émissions de matières opacifiantes à l'échappement des PL.

Masse [t]	v_{vhc} [km/h]											
	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
20	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
30	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6

Fig. 49 : coefficient de masse f_M pour les émissions de matières opacifiantes à l'échappement des PL.

Les émissions de matières opacifiantes produites par l'abrasion et la resuspension, $q_{ar,PL}$, dépend de la vitesse des véhicules. Les valeurs restent constantes.

v_{vhc} [km/h]	0	5	10	20	30	40	50
$q_{AR,PL}$ [$m^2/(h,vhc)$]	0	2.3	4.5	9.0	13.5	18.0	22.5

60	70	80	90	100
27.0	31.5	36.0	40.5	45.0

Fig. 50 : émissions de matières opacifiantes non dues aux moteurs des PL $q_{AR,PL}$ en $m^2/(h,vhc)$.

III.4 Évolution des émissions de base en fonction du temps

Les figures 51 à 54 mettent en évidence l'évolution des émissions de CO et de la totalité des émissions de matières opacifiantes produites par des véhicules circulant à 80 km/h sur une route sans déclivité à une altitude n'excédant pas 700 m. Les chiffres des figures 51 à 54 ont valeur d'information. Dans les calculs, on utilisera les valeurs indiquées aux figures 31 à 50.

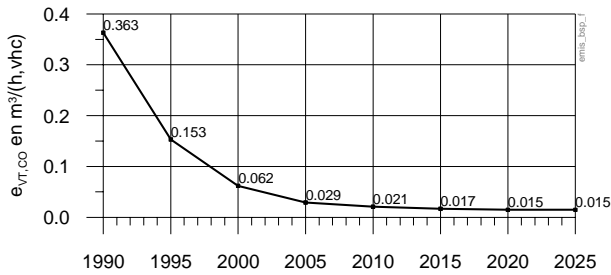


Fig. 51 : évolution des émissions de CO d'une VT moyenne.

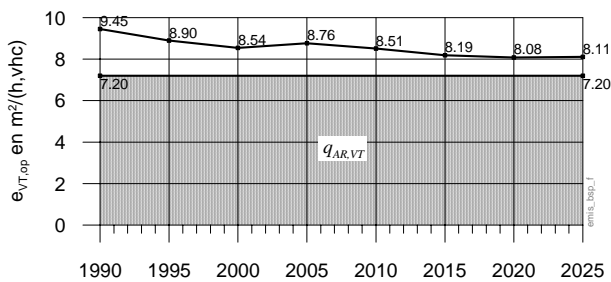


Fig. 52 : évolution des émissions de matières opacifiantes d'une VT moyenne.

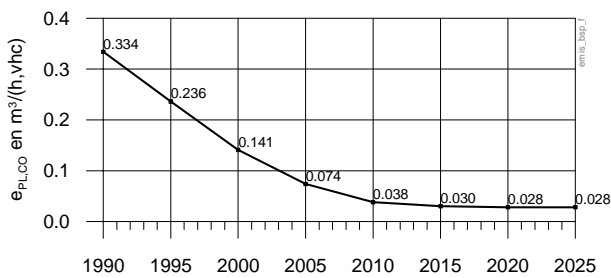


Fig. 53 : évolution des émissions de CO d'un PL de 18t.

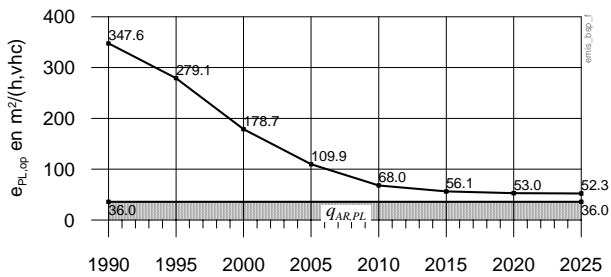


Fig. 54 : évolution des émissions de matières opacifiantes d'un PL de 18t.

IV VENTILATEURS DE JET

IV.1 Généralités

Lorsqu'on détermine le type de ventilateur, on prend en compte l'espace disponible dans le tunnel ainsi que d'autres paramètres tels que la longueur des câbles, l'entretien, les ventilateurs existants.

Le nombre de ventilateurs de jet n_{vj} se calcule selon la formule suivante :

$$n_{vj} = \frac{\Delta p_{néc}}{\Delta p_{vj}} \quad \text{Éq. IV-1}$$

avec

$$\Delta p_{vj} = \frac{\rho_{air} \cdot (v_{jet} - v_{air}) \cdot Q_{vj} \cdot \eta_{place} \cdot \eta_{poussée}}{A_{tunnel}} = \frac{\text{poussée}}{A_{tunnel}} \quad [\text{Pa}] \quad \text{Éq. IV-2}$$

- $\Delta p_{néc}$ pression en Pa nécessaire pour atteindre l'écoulement longitudinal v_{air}
- Δp_{vj} différence de pression générée par 1 ventilateur, en Pa
- ρ_{air} densité de l'air en kg/m^3
- v_{jet} vitesse du jet à la sortie du ventilateur en m/s
- v_{air} vitesse moyenne de l'air dans l'espace de circulation en m/s
- Q_{vj} débit volumique à travers le ventilateur de jet en m^3/s
- η_{place} rendement à la mise en place
- $\eta_{poussée}$ rendement de poussée (= *poussée nominale* / $(\rho_{air} \cdot v_{jet} \cdot v_{vj})$)
- A_{tunnel} section de l'espace de circulation du tunnel en m^2

IV.2 Caractéristiques des ventilateurs

Les paramètres ci-dessous donnent les caractéristiques typiques des ventilateurs de jet et le nombre de ventilateurs nécessaires est fonction de ces grandeurs. Notons que les valeurs effectives varient selon le fabricant ; il est dès lors important de déterminer le nombre définitif de ventilateurs de jet, en fonction de valeurs garanties par le constructeur.

Diamètre des pales [mm]	v_{jet} [m/s]	Q_{vj} [m^3/s]	Δp_{vj} en [Pa]		
			$v_{air} = - 3.0 \text{ m/s}^*$	$v_{air} = 1.5 \text{ m/s}$	$v_{air} = 3.0 \text{ m/s}$
630	40	12	8.8	7.9	7.5
1'000	33	23	14.1	12.3	11.7
1'250	33	40	24.5	21.4	20.4

* Direction de l'air soufflé par les ventilateurs opposée à la direction de l'écoulement d'air, dans l'espace de circulation des tunnels présentant une forte déclivité, afin de freiner l'écoulement dans les systèmes de ventilation avec extraction des fumées.

Fig. 55 : valeurs caractéristiques de quelques ventilateurs de jet :

Δp_{vj} valable avec $\rho_{air} = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $A_{tunnel} = 60 \text{ m}^2$ et $\eta_{place} \cdot \eta_{poussée} = 0,85$.

IV.3 Disposition

L'implantation des ventilateurs de jet doit être coordonnée avec la position des éléments pénétrant dans la section du tunnel et celle des sorties de secours. La distance longitudinale minimale devrait être de l'ordre de 100 m entre les ventilateurs de jet et de 80 m entre ceux-ci et les portails. Si un groupe de ventilateurs est exclusivement exploité vers l'intérieur du tunnel, sa distance au portail peut être réduite à 10 m. Dans tous les cas il doit y avoir une distance de 30 cm au minimum entre les ventilateurs de jet montés au-dessus des voies de circulation et la limite du gabarit d'espace libre. La distance entre l'enveloppe des ventilateurs de jet et les dalles est au minimum de 30 cm. Dans les nouvelles installations, on évitera de disposer des ventilateurs de jet latéralement, à côté du profil d'espace libre. Si la modification d'une installation existante ne permet qu'une disposition latérale, la distance au profil d'espace libre doit être de 60 cm au moins.

IV.4 Exploitation normale

Le dimensionnement des ventilateurs de jet pour l'exploitation normale suit les dispositions du §7.1.

IV.5 Exploitation en cas de sinistre

Les conditions déterminantes pour dimensionner les ventilateurs de jet de manière à maîtriser un sinistre sont exposées au §7.2 pour les différents types de trafic.

Pour une première approximation du nombre de ventilateurs de jet à implanter, on peut appliquer les indications des figures 56 relatives à la pression nécessaire pour atteindre l'écoulement longitudinal requis en cas de sinistre. Le nombre correspondant de ventilateurs de jet découle du tableau 55.

Les indications s'appliquent exclusivement pour les paramètres suivants :

- Tunnels avec ventilation longitudinale sans aspiration.
- Tubes à 2 voies de circulation avec un espace de circulation de 60 m² de section et un diamètre hydraulique D_h de 8.5 m.
- Déclivité constante sur toute la longueur du tunnel.
- Caractéristiques du trafic selon type de trafic (cf. figure 29 p.38).
 - TU 1 : THD = 3'300 vhc/(h,2 pistes) part des PL au THD = 7.5 %.
 - TU 2 : bouchon aux 3/4 du tunnel part de PL = 7.5 %.
 - TB : THD = 1'100 vhc/(h,piste) part des PL = 7.5 %.
- Pression du vent de 5 Pa opposée à l'écoulement.
- Différence de température naturelle défavorable entre l'espace de circulation et l'environnement de 10 K.

Déclivité [%]	Longueur du tunnel		
	1'000 m [Pa]	1'500 m [Pa]	3'000 m [Pa]
+ 5	64	81	130
+ 3	56	69	106
+ 1	48	58	83
0	44	51	72
- 1	55	74	99
- 3	95	120	158
- 5	136	165	218

Tunnel unidirectionnel avec faible fréquence d'embouteillages (TU 1)

Déclivité [%]	Longueur du tunnel	
	1'000 m [Pa]	1'500 m [Pa]
+ 5	68	95
+ 3	59	82
+ 1	51	69
0	46	62
- 1	68	87
- 3	112	135
- 5	156	183

Tunnel unidirectionnel avec forte fréquence d'embouteillages (TU 2)

Déclivité [%]	Longueur du tunnel	
	1'000 m [Pa]	1'500 m [Pa]
0	14	16
1	33	38
3	70	83
5	106	128

Tunnel bidirectionnel (TB)

Fig. 56 : pression nécessaire des ventilateurs de jet $\Delta p_{néc}$ en Pa. Ces valeurs sont valables pour les données de base indiquées plus haut.

V REMARQUES RELATIVES AUX COMPOSANTS (LISTE DE CONTRÔLE)

Composant	Exigences	Remarques
Ventilateurs d'apport et d'extraction (ventilateur, moteur, entraînement, y compris paliers)	Dimensionnement $Q/\Delta p$ pour tous les cas d'exploitation avec distance de sécurité à la limite de décrochement	Tenir compte du point d'exploitation le plus défavorable avec $\pm 10\%$ sur Δp et Q , et de l'instationnarité de la mise en marche
	Résistance à la température	Le cas d'incendie est déterminant pour les ventilateurs d'extraction (voir §8.3).
	Accessibilité pour entretien et remplacement	
	Émissions de bruit / silencieux	Observer les exigences de l'OPbruit [10] et de l'EIE
	Surveillance de la température du moteur	
	Surveillance des vibrations (décrochement)	Éviter le plus possible le décrochement de l'écoulement
	Étanchéité des raccords à l'air	Tenir compte du cas d'incendie
	Câbles électriques et de commande protégés de la chaleur	
Ventilateurs de jet	Implantation sûre, respecter les distances, assurance contre les chutes	Prendre des mesures de protection lorsque les ventilateurs sont placés dans des niches latérales
	Émissions de bruit / silencieux	Appliquer les prescriptions de l'OPbruit [10] et de l'EIE
	Amortissement des vibrations	
	Protection contre la corrosion	
Gaines d'apport et d'évacuation	Possibilité de les parcourir à pied	
	Étanchéité appropriée à l'air	Tenir compte des pertes lors du dimensionnement, à vérifier périodiquement
	Étanchéité à l'eau des gaines situées en dessous	A vérifier périodiquement
	Configuration aérodynamique, notamment des déflecteurs	
	Dalle intermédiaire : statique et résistance à la chaleur	Être attentif à la mise en place des clapets de ventilation
Orifices d'apport d'air contre l'espace de circulation	Possibilités de réglage (non télécommandé)	
	Accessibilité	

Composant	Exigences	Remarques
Clapets de ventilation	En l'absence d'alimentation électrique, restent dans la position en cours	
	Subdiviser les grandes ouvertures libres (sécurité)	Surface libre max. sans subdivision : env. 0,5 m ²
	Étanchéité à l'air	Une étanchéité particulièrement bonne n'est pas nécessaire, mais tenir compte des pertes lors du dimensionnement. Vérifier périodiquement l'étanchéité (év. automatisation par mesure de la vitesse dans la gaine dans des conditions bien précises)
	Alimentation électrique en étoile ou redondante	
	Entraînement et câbles électriques protégés de la chaleur	p.ex. dans la gaine d'apport d'air (voir chapitre 8)
	Test de fonctionnement automatisé	
Aspiration ponctuelle en exploitation normale	Débit max. d'aspiration ponctuelle = $10 \cdot A_{\text{tunnel}}$ en m ³ /s	Sécurité des motocyclistes
	Vitesse max. de l'écoulement à la limite du gabarit d'espace libre 5 m/s latéralement et 10 m/s en haut	Sécurité des motocyclistes
Clapets de fermeture	Tous les ventilateurs d'apport et d'évacuation d'air doivent être dotés de clapets de fermeture	Surveiller l'état des clapets
	Test de fonctionnement automatisé	
Aspiration d'air extérieur	La vitesse effective de l'air ne doit pas être excessive	max. env. 2 m/s
	Espace de déneigement	
	Grilles de protection aux prises d'air	
	Insonorisation	Appliquer les prescriptions de l'OPbruit [10] et de l'EIE
Cheminée d'aération	Examiner les conditions de propagation sur le site	Appliquer disposition de l'OPair [9], de l'OPbruit [10] et de l'EIE
	Vitesse de l'écoulement d'air à la sortie 7 – 15 m/s	Tenir compte du fonctionnement en régime partiel
	Hauteur au moins 10 m au-dessus du terrain ou 3 m au-dessus du couronnement des arbres; pour l'air dégagé par un incendie, 3 m au-dessus du terrain suffisent	Appliquer les prescriptions de l'OPair [9] et de l'EIE

VI DONNÉES SERVANT À OPTIMISER LE DIMENSIONNEMENT

VI.1 Généralités

Les coûts des investissements et les charges d'exploitation constituent un critère essentiel de l'évaluation de différentes solutions. Les calculs effectués à cet effet peuvent se faire uniformément en fonction des règles décrites ci-après.

Les investissements techniques, en particulier ceux qui concernent la construction, sont des investissements à long terme. Il faut donc tenir compte des taux d'intérêt et d'escompte réglant l'échelonnement des paiements. On utilise pour cela la méthode des annuités. En l'occurrence, on convertit les coûts des investissements en taux annuels constants sur toute la durée d'utilisation des infrastructures en les multipliant par le facteur d'annuité. Les charges annuelles JK peuvent être directement reprises si elles sont constantes. Dans le cas contraire, on en calculera les moyennes sur la durée d'utilisation. En général, le calcul se fait avec les valeurs réelles. Les coûts totaux comparables sont :

$$GK = KK + JK \quad \text{Éq. VI-1}$$

- GK coûts totaux annuels moyens
- KK charges annuelles moyennes du capital
- JK charges annuelles moyennes

Les conditions aux limites actuelles applicables aux calculs de rentabilité sont publiées périodiquement par l'Office fédéral des routes et l'Office fédéral de l'énergie. Les valeurs indiquées ci-après sont celles en vigueur actuellement (état 1999).

La directive OFROU "Élaboration des projets et construction des ouvrages d'art des routes nationales" [2] propose des remarques générales sur l'élaboration de projets.

VI.2 Amortissement du capital investi

En admettant des versements ultérieurs et un taux d'intérêt sur les capitaux constant pendant toute la durée d'utilisation ou la période considérée, on obtient l'équation suivante :

$$KK = IK_0 \cdot a = IK_0 \cdot \frac{(1+p)^n \cdot p}{(1+p)^n - 1} \quad \text{Éq. VI-2}$$

- KK charges annuelles moyennes du capital sur n années en Fr./a
- IK_0 coûts d'investissement (au temps 0) en Fr.
- a facteur d'annuité
- p taux d'intérêt annuel comptable sur le capital
- n durée d'utilisation ou période considérée en années

n en années	15	20	25	30	35	40	50	80
a	0.084	0.067	0.057	0.051	0.047	0.043	0.039	0.033

Fig. 57 : annuités pour $p = 3\%$ (exemple, autres valeurs selon l'éq. VI-2).

VI.3 Charges moyennes

En admettant des taux de renchérissement annuels constants, on obtient :

$$JK = JK_1 \cdot m_K \quad \text{Éq. VI-3}$$

- JK charges annuelles moyennes
- JK_1 charges générées la première année
- m_K facteur de pondération des charges

Les facteurs de pondération peuvent être calculés selon l'équation ci-dessous pour des versements ultérieurs en progression annuelle constante :

$$m = \frac{1}{1+p} \cdot \frac{\left(\frac{1+t}{1+p}\right)^n - 1}{\left(\frac{1+t}{1+p}\right)^n - 1} \cdot \frac{p}{1 - \frac{1}{(1+p)^n}} \quad \text{Éq. VI-4}$$

Si $t = p$, alors :

$$m = \frac{n}{1+t} \cdot \frac{t}{1 - \frac{1}{(1+t)^n}} \quad \text{Éq. VI-5}$$

m facteur de pondération
 t renchérissement annuel des charges et des produits
 p taux d'intérêt comptable annuel (taux réel)
 n durée d'utilisation ou période considérée en années

n en années	15	20	25	30	35	40	50	80
m	1.14	1.19	1.24	1.29	1.35	1.40	1.50	1.79

Fig. 58 : facteurs de pondération pour $p = 3\%$ et $t = 2\%$ (exemple, autres valeurs selon l'équation VI-4 respectivement VI-5).

VI.4 Durée d'utilisation ou période considérée

Dans les calculs généraux de rentabilité, on peut admettre les durées d'utilisation suivantes :

électronique 10 - 15 ans
 électricité et mécanique 20 - 25 ans
 construction 50 - 80 ans

Pour des calculs de rentabilité plus détaillés, la figure 59 propose des exemples de durée d'utilisation et de coûts d'entretien de différents composants.

	Composant	Durée d'utilisation <i>ND</i> [années]	Coûts d'entretien <i>UK</i> [% de IK_0]
Construction	creusement du tunnel	80	1
	béton armé	80	1
	ouvrages conventionnels	80	1
Orifices d'air	général	25	4
	apport d'air dans le tunnel	25	6
	évacuation d'air du tunnel	25	8
Gainés de ventilation	métalliques	40	6
	dalle intermédiaire dans béton	60	6
	ouvrages	80	6
Clapets de ventilation	clapets de fermeture	25	4
	clapets d'extraction télécommandés.	25	8
Moteurs	électrique	20	1
	diesel	20	4
Silencieux		25	1
Défecteurs		25	1
Ventilateurs	ventilation des locaux	15	4
	ventilateurs de jet	20	5
	ventilateurs axiaux	30	4
Installations électriques	régulation	10	5
	dispositif de mesure, détection	15	5
	transformateur de fréquence	15	2
	transformateurs	30	2
	câblage	25	1

Fig. 59 : exemples de durée d'utilisation et de coûts d'entretien annuels.

VI.5 Intérêt du capital et renchérissement

On applique un taux d'intérêt sur capital $p = 3 \%$ et un renchérissement $t = 2 \%$ dans les calculs de rentabilité.

VI.6 Prix de l'énergie

Les prix de l'énergie se composent d'un prix de base et d'un supplément comptable tenant compte des coûts externes. Actuellement, on applique les valeurs du tableau ci-dessous pour l'électricité.

Agent énergétique	Prix de base	Supplément	Prix total actuel
Électricité			
HT (haut tarif)	20 ct./kWh	5 ct./kWh	25 ct./kWh
NT (bas tarif)	10 ct./kWh	5 ct./kWh	15 ct./kWh
moyenne	15 ct./kWh	5 ct./kWh	20 ct./kWh

Fig. 60 : prix de l'énergie avec suppléments comptables (état 2004).

L'estimation du coût de l'énergie électrique se base sur les tarifs indiqués par le fournisseur d'énergie. Il faut prendre en considération le tarif de consommation en kilowattheure et le tarif de la taxe de puissance par kilowatt.

VI.7 Données nécessaires

Les calculs des coûts des investissements et des charges d'exploitation doivent appliquer les bases décrites plus haut et être effectués de manière à être vérifiables. Les données suivantes sont nécessaires :

Coûts d'investissement

- taux d'intérêt réel p et durée d'utilisation n
- coûts d'investissement IK_0 avec niveau de prix défini
- charges annuelles moyennes des capitaux KK

Charges d'exploitation et coûts d'entretien

- prix actuel des énergies (prix de base, supplément)
- taux d'intérêt réel p , renchérissement t et durée d'utilisation n
- coûts JK_1 durant la première année d'exploitation
- charges d'exploitation et coûts d'entretien annuels moyens JK

VII PRÉCISIONS DU 31 JUILLET 2006

VII.1 Domaine d'application

VII.1.1 But

La présente annexe VII précise quelques points de la directive *Ventilation des tunnels routiers - Édition 2004*. Ces précisions ont pour but de promouvoir la standardisation des installations de ventilation et de clarifier certains aspects prônant à confusion.

VII.1.2 Objet et application

Les précisions contenues dans cette annexe se réfèrent aux paragraphes de la directive *Ventilation des tunnels routiers - Édition 2004* mentionnés dans le tableau ci-dessous (Fig. 61).

Ces précisions sont partie intégrante de la directive; il est impératif d'en tenir compte.

Précisions (Annexe VII, 31 juillet 2006)	Directive "Ventilation des tunnels routiers" - Édition 2004
§VII.2.1 Volume d'extraction à l'endroit du sinistre	§7.2.4.2 Capacité d'extraction et influence sur l'écoulement longitudinal
§VII.2.2 Valeurs des fuites (pertes de pression)	§7.2.4.2 Capacité d'extraction et influence sur l'écoulement longitudinal
§VII.2.3 Volume d'extraction en cas de redondance	§7.2.7 Redondances
§VII.2.4 Dépression dans le canal d'évacuation	Non traité dans la directive
§VII.2.5 Flux d'air créés naturellement	§7.1.5 Influences météorologiques et thermiques §7.2.2 Pression due aux courants ascendants et à la différence de pression entre les portails

Fig. 61 : références des précisions aux paragraphes de la directive.

Les indications contenues dans cette annexe peuvent avoir des répercussions sur le dimensionnement des installations de ventilation des tunnels, ainsi que sur leur encombrement et l'énergie qu'elles requièrent. Il est nécessaire d'en tenir compte suffisamment tôt dans la planification du projet.

VII.2 Précisions

VII.2.1 Volume d'extraction à l'endroit du sinistre

Exigences de la directive au §7.2.4.2

La figure 24 de la directive donne les vitesses d'écoulement exigées au niveau de l'espace de circulation, en cas d'extraction.

De la vitesse d'écoulement minimale exigée de 3 m/s, respectivement de 2 x 1.5 m/s, résulte un volume d'extraction théorique minimal à l'endroit du sinistre de $Q_{ae,min} = 3 \text{ m/s} \times A_{tunnel}$; cette valeur comprend un éventuel apport d'air frais Q_{ap} , conformément à l'équation 7-22 de la directive. Le volume d'extraction effectif à l'endroit du sinistre Q_{ae} , est à déterminer sur la base du volume d'extraction minimal $Q_{ae,min}$, de manière à ce que les vitesses d'écoulement de l'air dans l'espace de circulation indiquées à la figure 24 soient respectées.

Précision

Pour remplir ces exigences tout en tenant compte d'une marge de manœuvre suffisante pour le pilotage du système de ventilation, le volume d'extraction à l'endroit du sinistre Q_{ae} , doit être fixé en augmentant d'une certaine valeur la valeur minimale $Q_{ae,min}$. Cette augmentation est fonction principalement du genre de trafic et de la complexité de la configuration du tunnel.

Valeurs de référence

Pour les tunnels avec trafic unidirectionnel et faible fréquence d'embouteillage (TU 1) une augmentation de $0.1 \times Q_{ae,min}$ est suffisante. Pour les tunnels avec trafic bidirectionnel (TB), il est nécessaire de fixer une augmentation de $1/3 \times Q_{ae,min}$. En présence de grandes déclivités et pour des configurations de tunnels avec des entrées et sorties supplémentaires, des considérations particulières sont nécessaires.

VII.2.2 Valeurs des fuites (pertes de pression)

Exigence de la directive au §7.2.4.2

Le volume des fuites entre le lieu d'extraction et l'emplacement des ventilateurs d'extraction Q_{fuites} , doit être pris en considération lors de la détermination de la quantité d'air $Q_{ventilateur}$ à extraire par les ventilateurs d'extraction (directive Éq. 7-24).

Précision

Le problème de la perméabilité des canaux de ventilation est apparu avec la mise en oeuvre de clapets de ventilation télécommandés. D'une part, les fuites du canal d'évacuation exigent une capacité d'aspiration plus élevée au niveau des ventilateurs, et d'autre part les fuites depuis l'espace de circulation sont préjudiciables à l'écoulement longitudinal de l'air dans ce même espace de circulation.

Les fuites dans le canal d'évacuation se composent des fuites des clapets de ventilation et des fuites dues à la construction. Les fuites des clapets de ventilation sont constituées par les flux d'air passant par les clapets fermés. Les fuites dues à la construction comprennent toutes les fuites des canaux d'évacuation, y compris l'air perdu passant par les défauts d'étanchéité entre la construction et les châssis des clapets. Il faut noter que les fuites dues à la construction peuvent augmenter avec le vieillissement de l'ouvrage et que les fuites à travers les clapets fermés peuvent augmenter avec l'encrassement et l'effet des forces appliquées.

Valeurs de référence

En se basant sur les connaissances actuelles on peut estimer les fuites, lors du dimensionnement des systèmes de ventilation, sur la base des valeurs indiquées ci-dessous, Δp représentant la différence de pression locale entre l'espace de circulation et le canal d'extraction.

Fuites de l'ouvrage, par mètre courant de canal :

$$q_{fuites,construction} = \frac{3}{10'000} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad \frac{(m^3 \cdot s^{-1})}{m} \quad \text{Éq. VII-1}$$

Fuites des clapets fermés en fonction de la surface intérieure au périmètre des châssis :

$$q_{fuites,clapets} = \frac{3}{1'000} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad \frac{(m^3 \cdot s^{-1})}{m^2} \quad \text{Éq. VII-2}$$

La totalité du volume des fuites peut être estimée à l'aide du nomogramme se trouvant au §VII.3.

VII.2.3 Volume d'extraction en cas de redondance

Exigences de la directive au §7.2.7

En cas de défaillance d'un ventilateur d'extraction, le débit de l'air extrait dans l'espace de circulation à l'endroit du sinistre doit s'élever au moins à 65 % de Q_{ae} (éq. 7-24 directive).

Précision

En cas de défaillance d'un ventilateur d'extraction, la quantité résiduelle exigée de 65 % se rapporte au volume d'air extrait Q_{ae} mentionné au §VII.2.1, y compris l'augmentation définie dans ce même paragraphe.

VII.2.4 Dépression dans le canal d'évacuation

Exigence de la directive

Aucune.

Précision

Une faible dépression dans le canal d'évacuation sollicite moins la construction et les composants mécaniques, ce qui entraîne une réduction des fuites. En outre, la puissance électrique nécessaire pour l'exploitation du système est sensiblement diminuée. Une faible augmentation de la section transversale du canal d'évacuation peut déjà procurer un gain important.

Valeur de référence

Pour les nouvelles installations de ventilation, la différence de pression entre l'espace de circulation et le canal d'extraction ne devrait pas dépasser 2'500 Pa.

VII.2.5 Flux d'air créés naturellement

Exigences de la directive au §7.1.5

La température dans l'espace de circulation est généralement constante et se situe souvent quelques degrés Kelvin au-dessus de la température annuelle moyenne à l'extérieur du tunnel. Les flux d'air créés naturellement varient avec les fluctuations de la température extérieure durant la journée et durant l'année. On peut estimer l'intensité de ces flux d'air à l'aide de statistiques des températures ambiantes (éq. 7-19 directive). Pour le dimensionnement, on utilisera 95 % de la valeur maximale dans la direction la plus défavorable.

Précision

Sur la base de mesures de températures dans les tunnels, il est possible de définir les différences de température déterminantes pour le dimensionnement.

Valeurs de référence

Dans le cas où des mesures des températures locales ne sont pas disponibles, la pression verticale naturelle dans un tunnel creusé peut être estimée en utilisant les valeurs suivantes pour la différence de températures entre l'espace de circulation et les environs :

- Pour les tunnels en plaine : 1°C tous les 450 m de longueur de tunnel.
- Pour les tunnels en montagne : 2°C tous les 450 m de longueur de tunnel.

Pour les tunnels de plus de 5 km de long, une étude plus approfondie est nécessaire.

VII.3 Nomogramme pour l'estimation des pertes de pression

Cf. §VII.2.2.

Les indications du nomogramme sont valables pour :

- des canaux homogènes sur toute leur longueur;
- des distances entre clapets de 100 m;
- des surfaces de clapets de 4 m²;
- une pression p_0 à l'extrémité du canal de 250 Pa.

p_1 désigne la pression dans le canal du côté du ventilateur. La pression dans l'espace de circulation a été admise constante. Par analogie, le nomogramme peut être utilisé pour une extraction aux 2 extrémités.

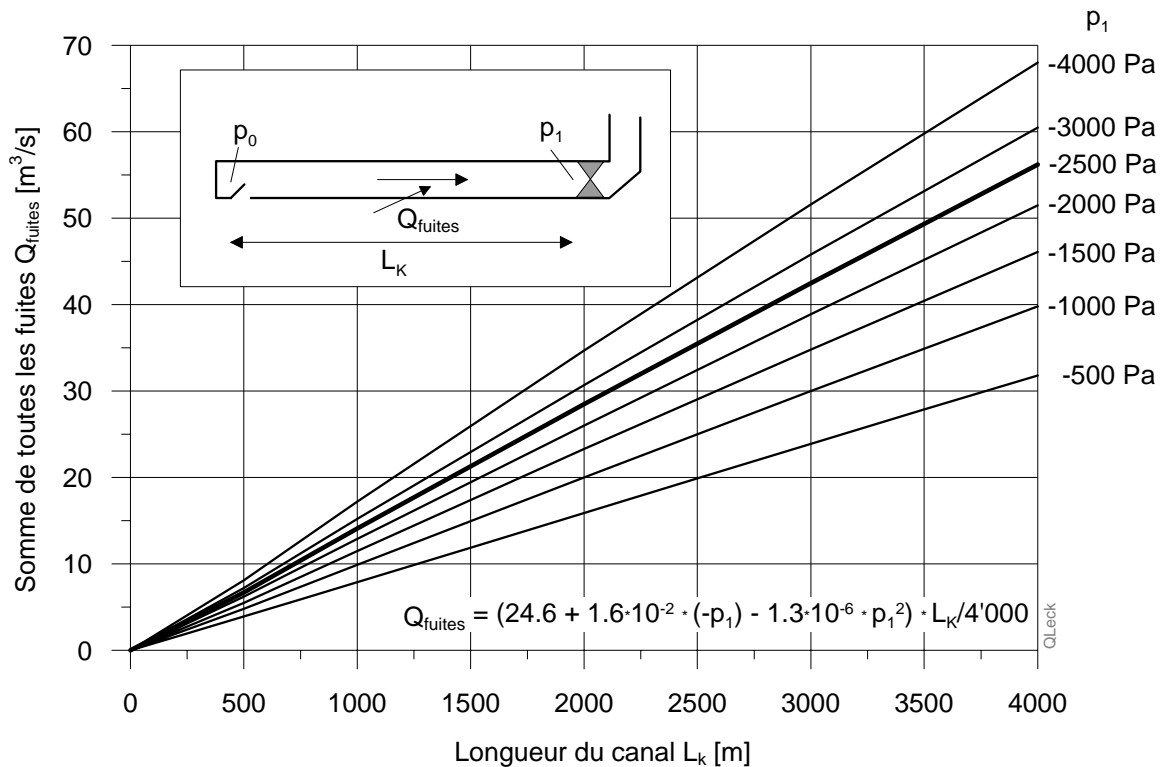


Fig. 62 : Nomogramme permettant d'estimer les pertes de pression du canal d'extraction.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bundesamt für Strassen (Mai 1983), "**Grundlagen der Belüftung von Strassentunneln**", *SHB-Bericht*.
- [2] Office fédéral des routes (1999), "**Directive - Élaboration des projets et construction des ouvrages d'art des routes nationales**".
- [3] Association mondiale de la route AIPCR (1999), "**Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers**".
- [4] Association mondiale de la route AIPCR (1995), "**Tunnels routiers : Émissions, ventilation, environnement**".
- [5] Association mondiale de la route AIPCR (novembre 2004), "**Tunnels routiers : Émissions des véhicules et besoin en air pour la ventilation**", *rapport 05.14.B*.
- [6] Association mondiale de la route AIPCR (1999), "**Tunnels routiers : Émissions, ventilation, environnement**", *rapport du groupe de travail 2*, Kuala Lumpur.
- [7] Studiengesellschaft Stahlanwendung (Juli 1998), "**Brände in Verkehrstunneln**", *Projekt 145.2 (EUREKA-Versuche)*, Düsseldorf.
- [8] Federal Highway Administration (November 1995), "**Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program**".
- [9] Ordonnance fédérale sur la protection de l'air (OPair).
- [10] Ordonnance fédérale sur la protection contre le bruit (OPbruit).
- [11] Bundesamt für Strassen (Entwurf 2004), "**Richtlinie - Branddetektion**".
- [12] Bundesamt für Strassen (Entwurf 2004), "**Richtlinie - Verkehrsfernsehen**".
- [13] Office fédéral des routes (projet 2004), "**Directive - Signalisation des dispositifs de sécurité dans les tunnels**".
- [14] Tiefbauamt des Kantons Graubünden (3 März 2003), "**Belüftung von Sicherheits- und Querstollen von Strassentunneln**", *Bericht US+FZ*.
- [15] Union des professionnels suisses de la route VSS (1998), "**Trafic déterminant**", *SN 640 016a*.
- [16] Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (2004), "**Manuel des coefficients d'émission HBEFA version 2.1**".
- [17] Société suisse des ingénieurs et des architectes (2004), "**Projets de tunnels - Bases générales**", *Norme-SIA 197*.
- [18] Société suisse des ingénieurs et des architectes (2004), "**Projets des tunnels - Tunnels routiers**", *Norme-SIA 197/2*.