Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral des routes OFROU

DIRECTIVE

VENTILATION DES TUNNELS ROUTIERS

Choix du système, dimensionnement et équipement

Édition 2021 V3.01
ASTRA 13001

Impressum

Auteurs / groupe de travail à partir de V3.00
Crausaz Bernard (OFROU DS-UARS, présidence)
Zumsteg Franz (US+FZ Beratende Ingenieure, Lenzburg, élaboration)
Hofer Günter (OFROU I-FU)

Auteurs / groupe de travail jusqu'à V2.03
Jeanneret Alain (OFROU N-SFS, présidence)
Allemann Martin (OFROU I-FU)
Berner Marcel (OFROU I-NV)
Fragnoli David (OFROU I-FU)
Hofer Andreas (OFROU I-FU)
Joseph Cédric (OFROU N-SFS)
Lüthy Daniel (OFROU I-FU)
Steinemann Urs (US+FZ Beratende Ingenieure, Wollerau)
Zumsteg Franz (US+FZ Beratende Ingenieure, Lenzburg, élaboration)

Traduction
Grandjean Pierre (traduction française de la version originale allemande)

Éditeur
Office fédéral des routes OFROU
Division réseaux routiers N
Standards et sécurité de l'infrastructure SSI
3003 Berne

Diffusion
La directive est téléchargeable gratuitement sur le site www.astra.admin.ch.

© ASTRA 2021
Reproduction à usage non commercial autorisée avec indication de la source.

Avant-propos

Les principes de la directive « Ventilation des tunnels routiers » publiée pour la première fois en décembre 2004 étaient déjà appliqués depuis 2001. La plupart des tunnels routiers actuellement ouverts à la circulation satisfont aux exigences de la directive, ou ont été adaptés dans la mesure du possible. La nouvelle stratégie de ventilation a fait ses preuves lors de divers événements.

La nouvelle version 3 contient, outre des adaptations mineures, l'extension des données pour le calcul des émissions jusqu'à l'année 2060.

Office fédéral des routes

Jürg Röthlisberger
Directeur

Table des matières

Impressum **2**
Avant-propos **3**

1 Introduction **7**
1.1 Objectif de la directive 7
1.2 Champ d'application 7
1.3 Destinataires 7
1.4 Entrée en vigueur et modifications 7

2 Fonctions de la ventilation **8**
2.1 Objectifs de protection 8
2.2 Ventilation en cas de trafic normal 8
2.3 Ventilation en cas de sinistre 8
2.4 Réduction des atteintes à l'environnement 8

3 Description des systèmes de ventilation **9**
3.1 Systèmes principaux de ventilation 9
3.2 Ventilation naturelle 9
3.3 Ventilation mécanique sans aspiration en cas de sinistre 9
3.3.1 Généralités 9
3.3.2 Ventilation longitudinale par ventilateurs de jet 9
3.4 Ventilation mécanique avec aspiration en cas de sinistre 10
3.4.1 Généralités 10
3.4.2 Ventilation avec aspiration, sans apport d'air frais 10
3.4.3 Ventilation avec aspiration et apport d'air frais 11
3.5 Systèmes de ventilation combinés 12

4 Application de la directive **13**

5 Données de base nécessaires **14**
5.1 Données concernant les tunnels 14
5.2 Données concernant le trafic 14
5.3 Autres données 15

6 Choix du système de ventilation **16**
6.1 Démarche 16
6.2 Principaux genres de trafic 16
6.3 Choix du système principal de ventilation 17
6.3.1 Champs d'application des systèmes principaux de ventilation 17
6.3.2 Autres paramètres déterminants 18
6.3.3 Diminution des nuisances additionnelles à proximité des portails 19
6.4 Détermination du système de ventilation 20
6.4.1 Généralités 20
6.4.2 Groupe principal de ventilations sans aspiration 20
6.4.3 Groupe principal de ventilations avec aspiration 20

7 Dimensionnement **21**
7.1 Dimensionnement pour l'exploitation normale 21
7.1.1 Données concernant le trafic 21
7.1.2 Valeurs de dimensionnement pour la qualité de l'air 23
7.1.3 Calcul des émissions 23
7.1.4 Besoins en air frais 23
7.1.5 Influences météorologiques et thermiques 25
7.1.6 Données entrant dans les calculs de l'écoulement 25

7.1.7 Indications relatives aux systèmes sans aspiration ... 26
7.1.8 Indications relatives aux systèmes avec aspiration ... 26
7.1.9 Empêchement de courts-circuits dans les flux d'air ... 27
7.2 Dimensionnement pour l'exploitation en cas de sinistre ... 27
7.2.1 Sinistres de référence pour le dimensionnement des ventilations ... 27
7.2.2 Pression due aux courants ascendants et à la différence de pression entre les portails ... 28
7.2.3 Indications relatives aux systèmes sans aspiration ... 29
7.2.4 Indications relatives aux systèmes avec aspiration ... 30
7.2.5 Analyse de scénarios ... 32
7.2.6 Empêchement de courts-circuits dans les flux d'air ... 33
7.3 Exigences en cas de pannes et d'interruptions d'exploitation ... 33
7.3.1 Pannes survenant pendant un sinistre ... 33
7.3.2 Interruptions de l'exploitation pendant les périodes d'entretien ... 34
7.4 Réduction des nuisances additionnelles à proximité des portails ... 34
7.4.1 Polluants atmosphériques ... 34
7.4.2 Bruit des ventilateurs ... 35
7.5 Optimisation de l'installation ... 35
7.6 Ventilation des locaux d'exploitation ... 35
7.7 Documentation du dimensionnement ... 35

8 Équipement ... 36
8.1 Généralités ... 36
8.2 Instruments de mesure et équipement de détection ... 36
8.2.1 Exploitation normale ... 36
8.2.2 Cas de sinistre ... 37
8.2.3 Exigences ... 37
8.3 Résistance à la température ... 38
8.3.1 Ventilateurs d'extraction ... 38
8.3.2 Ventilateurs de jet ... 38
8.3.3 Clapets de ventilation ... 38
8.4 Chemins de fuite ... 38

9 Conditions d'exploitation ... 39
9.1 Qualité de l'air dans l'espace de circulation ... 39
9.2 Pilotage ... 39
9.2.1 Système de mesure et de détection ... 39
9.2.2 Ventilateurs de jet ... 39
9.2.3 Débits d'air vicié ... 39
9.2.4 Apport d'air frais en cas de sinistre ... 39
9.2.5 Clapets de ventilation télécommandés en exploitation normale ... 39
9.2.6 Clapets de ventilation télécommandés ainsi que ventilateurs d'extraction et d'apport d'air en cas d'incendie ... 39
9.3 Traçabilité d'évènements particuliers ... 40
9.4 Alimentation sans coupure (UPS) ... 40

10 Vérifications particulières ... 41
10.1 Exigences particulières pour les composants de l'installation ... 41
10.2 Mise en service de l'installation et instruction ... 41

11 Travaux de maintenance et d'entretien ... 42
11.1 Qualité de l'air dans l'espace de circulation ... 42
11.2 Étendue des travaux ... 42

Annexes ... 43

Glossaire ... 69
Bibliographie ... 71
Liste des modifications ... 73

1 Introduction

1.1 Objectif de la directive

La ventilation des tunnels comprend l'ensemble des équipements nécessaires pour maintenir une qualité d'air suffisante à l'intérieur des tunnels, aussi bien en exploitation normale qu'en situations exceptionnelles telles que perturbations du trafic ou accidents. Le système de ventilation d'un tunnel comprend 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 sa publication. Elle fixe les principes et les critères à observer dans le choix du 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.

1.2 Champ d'application

La présente directive concerne la ventilation des tunnels et des tranchées couvertes du réseau routier. Elle décrit le choix du système, le dimensionnement et l'exploitation de la ventilation des tunnels routiers. Elle énumère les exigences relatives à l'exploitation et à l'entretien des installations de ventilation des tunnels.

Elle définit un standard découlant de l'état de la technique, applicable également lors de l'assainissement de tunnels existants.

1.3 Destinataires

La présente directive s'adresse :

- aux maîtres d'ouvrages, qui y trouveront l'instrument leur permettant de procéder à une première évaluation de projets simples ;
- 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, dès les premières phases du projet, des données nécessaires pour assurer la coordination entre les différents spécialistes ;
- 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.

1.4 Entrée en vigueur et modifications

La présente directive entre en vigueur le 01.06.2008. La « liste des modifications » se trouve à la page 73.

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 l'espace de circulation en air frais 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 de la zone du portail par l'air extrait du tunnel.

2.2 Ventilation en cas de trafic normal

Une amenée d'air frais dans l'espace de circulation est nécessaire afin de maintenir une qualité d'air suffisante. Pour déterminer les besoins en air frais, on tient compte, non seulement du trafic horaire déterminant (THD), mais également de la probabilité d'évènements tels que circulation congestionnée, embouteillages ou accident. On tiendra compte également des exigences lors de 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 les accès libres de fumée 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 les substances volatiles toxiques des usagers du tunnel.

2.4 Réduction des atteintes à l'environnement

On prendra en considération les aspects suivants :

- les zones des portails doivent être protégées d'immissions polluantes dues à l'air vicié extrait du tunnel.

3 Description des systèmes de ventilation

3.1 Systèmes principaux de ventilation

Les systèmes de ventilation sont divisés en trois groupes principaux :

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

3.2 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 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, les fumées s'échappent généralement par le portail situé le plus haut.

3.3 Ventilation mécanique sans aspiration en cas de sinistre

3.3.1 Généralités

Les systèmes de ventilation sans aspiration en cas de sinistre concernent les tunnels ou les tronçons de tunnels, ventilés longitudinalement exclusivement dans l'espace de circulation.

3.3.2 Ventilation longitudinale par ventilateurs de jet

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

Exploitation normale

Dans les tunnels à circulation unidirectionnelle, l'écoulement de l'air est généralement identique au sens de déplacement des véhicules.

Dans les tunnels bidirectionnels, les ventilateurs de jet doivent amplifier les effets du trafic, les écarts de température et les différences de pression barométrique entre les portails.

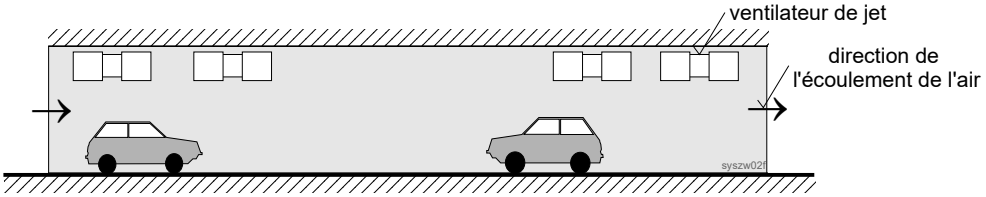

Fig. 3.1 Ventilation longitudinale par des ventilateurs de jet. Applicable en trafic bidirectionnel ou unidirectionnel.

L'extraction éventuelle de l'air vicié avant le portail de sortie permet de diminuer la charge polluante au voisinage du portail de sortie des tunnels unidirectionnels (ventilation destinée à réduire les immissions). Dans ce cas particulier, la ventilation longitudinale est renforcée par l'effet de piston exercé par les véhicules ou, en cas de trafic congestionné ou d'embouteillages, par des ventilateurs de jet. (Pour le cas des tunnels bidirectionnels, cf. chap. 3.4.2).

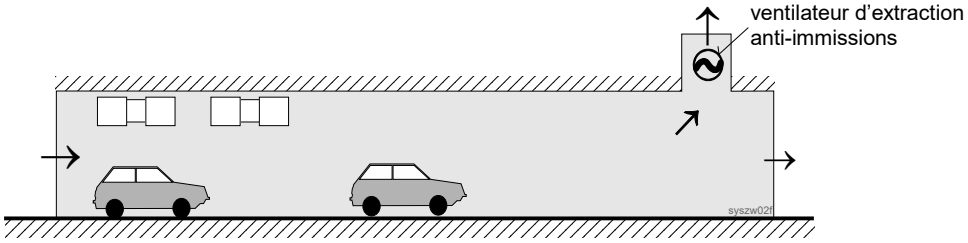

Fig. 3.2 Ventilation longitudinale avec ventilateurs de jet et ventilateur d'extraction anti-immissions. Objectif : diminuer la charge polluante au voisinage du portail de sortie des tunnels unidirectionnels.

Exploitation en cas de sinistre

En cas de sinistre, les fumées se propagent dans l'axe du tunnel. La direction et la vitesse de propagation des fumées dans l'espace de circulation sont renforcées par les ventilateurs de jet.

3.4 Ventilation mécanique avec aspiration en cas de sinistre

3.4.1 Généralités

En cas de sinistre, l'aspiration concentrée est généralement effectuée à l'aide de ventilateurs centraux 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 forcer 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 chapitre 3.3.2.

Dans les tunnels à trafic bidirectionnel, lorsque la ventilation longitudinale, d'un portail à l'autre, ne suffit pas pour respecter les limites de concentration des polluants, le tunnel peut être divisé en deux segments de ventilation longitudinale par l'ouverture de clapets déterminés.

Dans les tunnels à trafic unidirectionnels, l'aspiration ponctuelle avant le portail de sortie permet de diminuer des charges polluantes supplémentaires au voisinage du portail (cf. fig. 3.2).

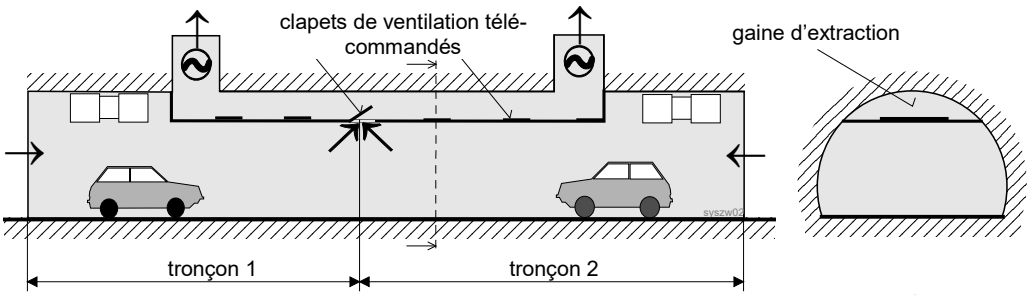

Fig. 3.3 *Ventilation avec aspiration, sans apport d'air frais.*

Exploitation en cas de sinistre

En cas de sinistre, les fumées et les gaz sont aspirés à l'endroit du sinistre à travers des clapets de ventilation télécommandés. Au besoin, l'écoulement d'air longitudinal dans l'espace de circulation est renforcé 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, au niveau de la chaussée, sur toute la longueur du tunnel. Cela nécessite une gaine 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 modes de ventilation possibles sont :

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

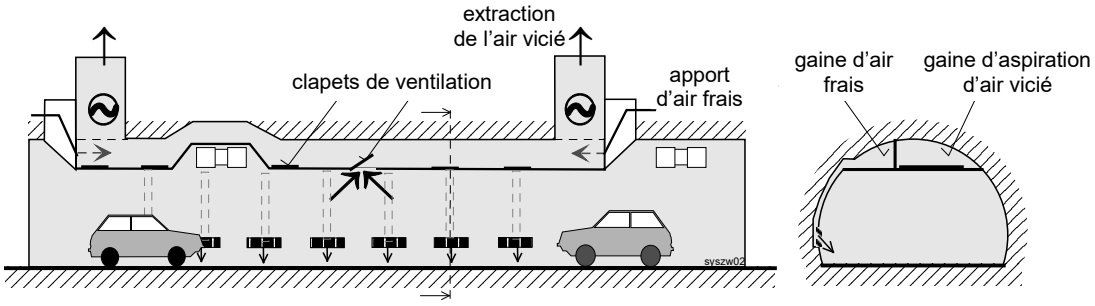

Fig. 3.4 *Ventilation avec aspiration d'air vicié et amenée d'air frais.*

On parle de ventilation semi-transversale lorsque de l'air frais est injecté, au niveau de la chaussée, sur toute la longueur du tunnel, clapets de ventilation fermés. Dans le cas d'une ventilation transversale l'air vicié est aspiré par les clapets de ventilation partiellement ouverts sur toute la longueur du tunnel.

Exploitation en cas de sinistre

En cas de sinistre, les fumées et les gaz 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 compatible avec la capacité d'extraction (chap. 7.2.4). Au besoin, l'écoulement d'air longitudinal, dans l'espace de circulation, est régulé par des ventilateurs de jet.

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

3.5 Systèmes de ventilation combinés

Dans les configurations complexes, on peut combiner entre eux plusieurs des systèmes de base décrits plus haut. Les systèmes de ventilation et l'exploitation des différents secteurs de tunnels doivent être coordonnés entre eux. Il est important notamment de prendre en compte la pollution initiale de l'air lors de son passage d'un tronçon à un autre.

4 Application de la directive

Lors de la conception et de la planification d'un tunnel routier, il est essentiel de choisir très tôt les éléments principaux qui auront des conséquences importantes sur la construction, l'entretien et l'exploitation de l'ouvrage et de son installation de ventilation. Il est donc important de coordonner les objectifs dans les différents domaines que sont la construction, la sécurité, la protection de l'environnement et dispositions architecturales.

La directive de l'OFROU « Élaboration des projets et construction des ouvrages d'art des routes nationales » [3] comprend un descriptif des différentes phases de projets.

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

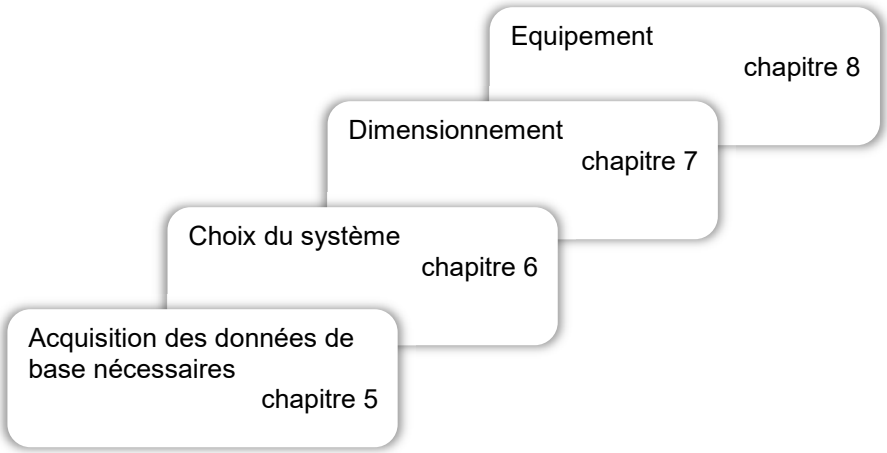

Fig. 4.5 Étapes de l'application de la directive.

5 Données de base nécessaires

Les données de base ci-après doivent être disponibles tant pour le choix du système de ventilation que pour son dimensionnement. Elles doivent être vérifiées à chacune des phases 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 de jet.
- Profil en long avec les altitudes.
- Implantation possible des centrales et des 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 relatives au trafic suivantes:

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

Par ailleurs, pour le dimensionnement selon le chapitre 7, il est nécessaire 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 de mise en service prévue et 10 ans plus tard.
- Part des poids lourds au THD l'année de mise en service prévue 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 chaque catégorie de véhicules.
- Admission dans le trafic de véhicules agricoles, de motocycles et de vélos ainsi que de piétons.
- Potentiel d'embouteillages par tube exprimée en nombre d'heures de bouchons par an pour l'année de mise en service prévue et 10 ans plus tard. On tiendra compte également des particularités du tracé dans les zones précédant le tunnel (voies d'entrée et de sortie, intersections, etc.) et des possibilités de gestion du trafic.
- Évaluation de la probabilité d'une future modification sensible des données de base.

Le laps de temps de 10 ans après l'année de mise en service prévue signifie que, au moment de la planification, l'horizon des prévisions se situe à 15 voire 25 ans. Les incertitudes que revêtent de telles hypothèses rendent les pronostics à plus long terme inopportuns.

5.3 Autres données

Le choix et le dimensionnement d'un système de ventilation peuvent être influencés par d'autres facteurs et d'autres hypothèses, 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 des composants principaux de l'installation de ventilation s'effectue pour chaque tube et comporte les étapes suivantes :

1) Détermination du genre habituel de trafic selon le chap. 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 peuvent parcourir les fumées et les gaz lors d'un incendie.
3) Détermination, à l'aide de la figure 6.2, du ou des composants principaux du système de ventilation possible, sur la base du genre habituel de trafic et de la longueur déterminante du tunnel, tels qu'ils ont été définis aux points 1 et 2 ci-dessus.
4) Si l'on se trouve entre deux possibilités de systèmes de ventilation, le choix doit être affiné à l'aide des paramètres décrits au chap. 6.3.2 (attribution des secteurs A, B ou C).
5) Si l'évaluation ne permet toujours pas de choisir entre deux systèmes de ventilation le choix doit être étayé par une évaluation détaillée. La solution choisie doit, dans tous les cas, être motivée clairement.

Si la démarche aboutit à des systèmes différents pour l'un et l'autre des deux tubes d'un tunnel, il y a lieu d'examiner l'opportunité d'un tel résultat point de vue technique de construction.

Si, en vertu de la figure 6.2, 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 étude distincte doit être réalisée selon la méthode décrite au chap. 6.3.3 pour établir s'il est nécessaire de diminuer les charges polluantes générées au voisinage des portails. On pourra en déduire la nécessité ou non de prévoir une aspiration de l'air vicié du tunnel pour des raisons environnementales.

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 [17], page 159 :

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

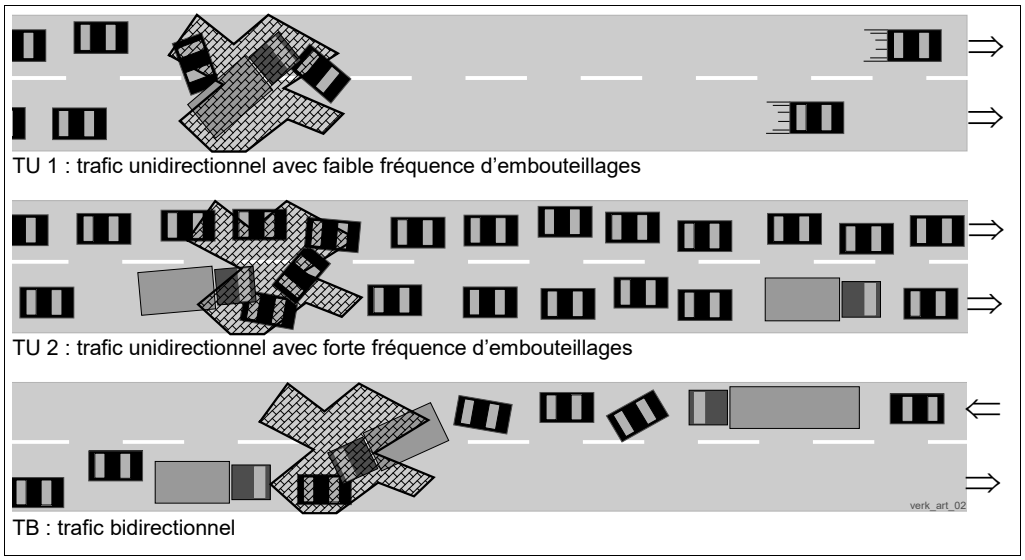

Fig. 6.1 Principaux genres de trafic en fonction des risques d'embouteillages en cas de sinistre.

Dans les tunnels unidirectionnels, on distinguera entre un sinistre se déclarant en circulation fluide et un sinistre se déclarant dans un bouchon ou à la fin d'un bouchon. Lors d'un sinistre sans bouchon préalable, les fumées se propagent en principe dans la même direction que les véhicules (effet piston) ; tout au moins au début du sinistre (fig. 6.1, TU 1). Les véhicules ayant déjà dépassé l'endroit du sinistre quittent le tunnel. Aucun usager n'est en danger immédiat.

Lors d'un sinistre avec bouchon, des usagers peuvent se trouver des deux côtés du sinistre. Il est possible qu'au début, les fumées se propagent de part et d'autre du sinistre (fig. 6.1, TU 2). En vertu des exigences posées aux installations présentant une forte probabilité d'embouteillages (TU 2), en zone urbaine, la ventilation de tunnels à deux tubes doit être dimensionnée indépendamment des prévisions de trafic.

Pour les tunnels bidirectionnels, on admettra également que des bouchons peuvent se former de part et d'autre du sinistre (fig. 6.1, TB).

Dans un tunnel unidirectionnel, avec forte fréquence d'embouteillages, la ventilation doit être dimensionnée en fonction d'un sinistre survenant dans un embouteillage ou à la fin de celui-ci. Lorsque cette probabilité est faible, le dimensionnement de l'installation de ventilation ne tiendra pas compte des embouteillages.

Le dimensionnement de la ventilation d'un tunnel unidirectionnel ne tiendra pas compte de l'exploitation exceptionnelle en trafic bidirectionnel (chap. 7.2.3).

6.3 Choix du système principal de ventilation

Les considérations selon le chap. 6.3 s'appliquent aux tunnels présentant des déclivités inférieures à 5 %. Des déclivités plus importantes exigent des considérations particulières liées au déroulement chronologique des phénomènes se produisant en cas de sinistre.

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

6.3.1 Champs d'application des systèmes principaux de ventilation

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

Système de ventilation naturelle

Système de ventilation sans aspiration en cas de sinistre

Système de ventilation avec aspiration en cas de sinistre

Au besoin, l'attribution à l'une des catégories A, B ou C (fig. 6.2) s'effectue à l'aide d'autres paramètres selon les données du chap. 6.3.2.

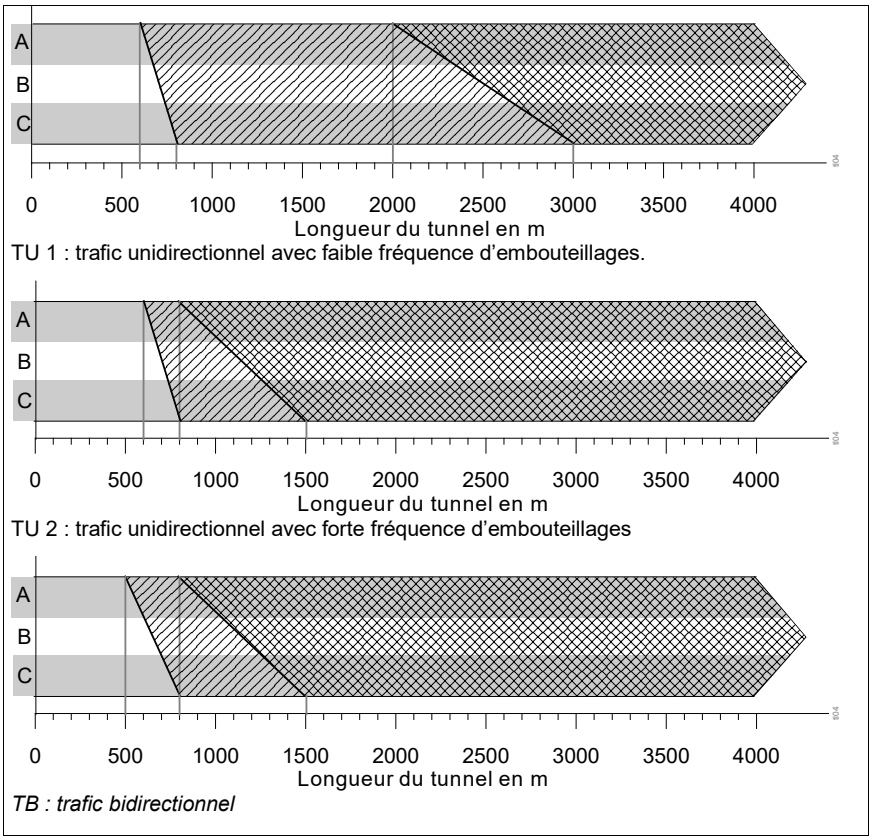

Fig. 6.2 Détermination du système principal de ventilation pour les tunnels avec des déclivités jusqu'à 5 %, en fonction des besoins relevant de la sécurité.

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 le système principal de ventilation, l'évaluation tiendra compte des autres paramètres énumérés ci-dessous.

Évaluation globale

Les trois évaluations partielles selon les figures 6.4 à 6.6 permettent une évaluation globale déterminante selon la figure 6.3 Lorsqu'une analyse plus poussée est nécessaire, cette évaluation globale est à introduire dans la figure 6.2.

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. 6.3 Évaluation globale déterminante en fonction des évaluations partielles.

Trafic global

L'évaluation tiendra compte de la prévision de trafic lors de la mise en service et de la prévision 10 ans plus tard. Le trafic déterminant est le TJM divisé par le nombre de voies. On tiendra compte de l'influence des bretelles d'entrée et de sortie sur le rendement de la ventilation ainsi que de leurs effets sur la charge de trafic.

Évaluation partielle	TJM / voies de circulation	
Trafic global	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. 6.4 Évaluation du paramètre « trafic global ».

Trafic des poids lourds

Le facteur déterminant est le nombre journalier moyen de poids lourds prévu lors de la mise en service et la prévision 10 ans plus tard, exprimé en PL par 24 h et par voie de circulation.

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

Fig. 6.5 Évaluation du paramètre « trafic des poids lourds ».

Déclivité dans le tunnel

La déclivité a un effet sur la quantité des émissions des véhicules et, en raison de la vitesse réduite des poids lourds, sur la ventilation naturelle. De plus, l'effet de cheminée entre des 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 (valable avec ou sans aspiration). Dans les tunnels à deux tubes, l'analyse doit être faite séparément pour chaque tube.

Évaluation partielle	Valeur maximale de la déclivité moyenne par tronçons de 800 m, en %		
Déclivité	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. 6.6 Évaluation du paramètre « déclivité »; valeurs négatives : descente; valeurs positives : montée.

La maîtrise d'un incendie dans un tunnel présentant une déclivité < - 5 % dans le cas de trafic unidirectionnel avec faible fréquence d'embouteillages et < - 5 % ou > + 5 % dans le cas de trafic unidirectionnel avec forte fréquence d'embouteillages, nécessite des investigations plus poussées. Elles tiendront compte du déroulement chronologique du sinistre selon les indications du chap. 7.2. Les tunnels bidirectionnels présentant une déclivité supérieure à 5 % seront examinés de la même manière.

6.3.3 Diminution des nuisances additionnelles à proximité des portails

Les paramètres ci-dessus ont un effet, à la fois sur la qualité de l'air dans le tunnel et sur la sécurité. Des critères propres à maintenir une certaine qualité de l'air dans les zones des portails peuvent influencer le choix de certains éléments de ventilation ou contribuer à la mise en place d'installations d'aspiration d'air vicié supplémentaires (chap. 7.4.1).

6.4 Détermination du système de ventilation

6.4.1 Généralités

Les évaluations selon chap. 6.3 aboutissent au choix du système principal de ventilation. Les systèmes possibles sont indiqués à la figure 6.7.

	Groupes principaux de systèmes de ventilation		
	Ventilation naturelle (chap. 3.2)	**Ventilation sans aspiration (chap. 3.3)**	**Ventilation avec aspiration (chap. 3.4)**
Systèmes de ventilation usuels	Ventilation naturelle	Ventilation longitudinale avec ventilateurs de jet sans aspiration (fig. 3.1 et 3.2)	Ventilation avec aspiration et ventilateurs de jet sans apport d'air frais (fig. 3.3) Ventilation avec aspiration, ventilateurs de jet et apport d'air frais (fig. 3.4)

Fig. 6.7 Systèmes de ventilation usuels.

6.4.2 Groupe principal de ventilations sans aspiration

Le faible niveau d'émissions des véhicules actuels permet en général de réaliser une ventilation longitudinale avec des ventilateurs de jet, sans aspiration de fumées ou d'autres gaz dégagés lors d'un sinistre. Si des raisons environnementales n'autorisent pas le rejet des fumées au portail (chap. 7.4.1) une aspiration ponctuelle (fig. 3.2) peut s'avérer nécessaire.

6.4.3 Groupe principal de ventilations avec aspiration

Dans les nouveaux tunnels, un apport mécanique d'air frais n'est nécessaire que dans des cas exceptionnels. Le calcul des besoins d'air frais selon le chap. 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. Les exigences les plus sévères sont déterminantes.

Les descriptions figurant dans ce chapitre se limitent à la présentation des particularités de la technique de ventilation et à 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 scénarios de trafic considérés dans la phase de planification, y compris, s'il y a lieu, les scénarios exceptionnels de trafic bidirectionnel dans les tunnels unidirectionnels, ainsi que les situations de trafic congestionné et de bouchons.

Les chapitres 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 chapitres 7.1.7 et 7.1.8 fournissent des indications relatives aux systèmes de ventilation mécanisés.

7.1.1 Données concernant le trafic

Trafic déterminant

La ventilation sera dimensionnée sur base de la valeur maximale du trafic horaire déterminant (THD), l'année de mise en service prévue et 10 ans plus tard (chap. 5.2). Dans les tunnels unidirectionnels, chaque tube doit être dimensionné séparément.

Cas de trafic

En phase d'exploitation normale, le dimensionnement de l'installation de ventilation sera généralement basé sur un trafic fluide, avec une vitesse de 40 km/h ou plus. Les situations de circulation congestionnée ou de bouchons ne seront prises en compte que si elles risquent de survenir régulièrement, c'est-à-dire durant plus de 50 heures par année. S'il n'existe aucune estimation prévisionnelle donnant une idée de la fréquence des situations de circulation congestionnée, on pourra l'estimer en se basant sur les indications en annexe (annexe II.3) en tant que première approche. Si le THD coïncide avec des situations à fortes fréquences d'embouteillages et s'il est impossible d'éviter des bouchons dans le tunnel, l'installation de ventilation doit être dimensionnée en fonction des scénarios de circulation congestionnée et avec bouchons. On prendra également en compte d'éventuelles particularités du réseau routier qui ont une incidence sur les flux du trafic, comme les changements de voies dans un tunnel ou à proximité de son entrée.

Trafic bidirectionnel exceptionnel

Le système de ventilation d'un tunnel unidirectionnel ne sera pas choisi en tenant compte des situations exceptionnelles de trafic bidirectionnel dans un tube. En revanche, le dimensionnement du système de ventilation choisi pour l'exploitation normale tiendra compte des situations exceptionnelles d'un trafic bidirectionnel, en considérant que des déviations du trafic et des restrictions d'exploitation de courte durée sont possibles.

Densité du trafic

Pour la détermination de la longueur des poids lourds, il convient d'utiliser la relation suivante entre PL et VT ou UVT : 1 PL = 2 VT ≙ 2 UVT (unité-voiture).

Lorsque les véhicules sont à l'arrêt, on admettra une densité de trafic de 150 UVT/km par voie de circulation.

Vitesse de circulation

Pour le trafic fluide, on admettra les vitesses suivantes:

$$v_{VT} = v_{sig} \quad \text{[km/h]} \qquad \textit{Éq. 7.1}$$

$$v_{PL} = MIN\left(v_{PL,max}, v_{VT}\right) \quad \text{[km/h]} \qquad \textit{Éq. 7.2}$$

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

$v_{PL,max}$ est tirée de la figure 7.1.

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

Fig. 7.1 Vitesse maximale des poids lourds $v_{PL,max}$ admises pour le dimensionnement de la ventilation, sur des tronçons de différentes déclivités.

Les valeurs de la figure 7.1 pour les déclivités importantes sont tirées de mesures effectuées sur un axe 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, la vitesse limite des voitures de tourisme (VT) v_{VT} sera admise égale à la vitesse maximale $v_{PL,max}$ des poids lourds (PL).

Capacité des tunnels

Par analogie aux données [16] page 9 et à partir d'analyses de postes de comptage, la capacité des tunnels se situe dans les fourchettes indiquées aux figures 7.2 et 7.3. Les limites supérieures des graphiques correspondent à un tunnel à tracé pratiquement rectiligne, avec un taux élevé de trafic longue distance et de pendulaires. Les limites inférieures des graphiques correspondent à un tunnel emprunté essentiellement par du trafic de loisirs et de tourisme.

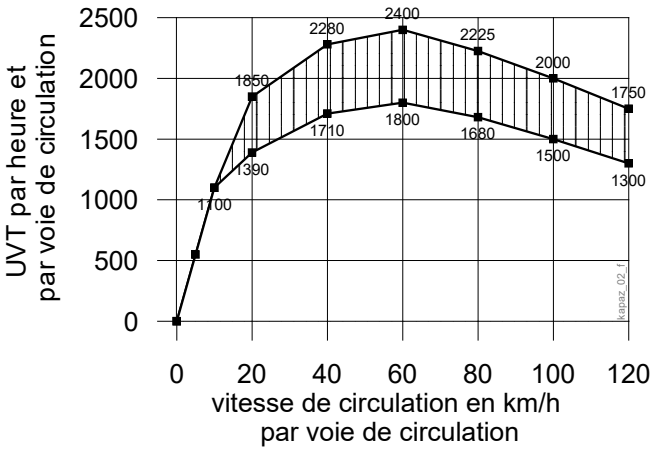

Fig. 7.2 Capacité des tunnels à trafic unidirectionnel.

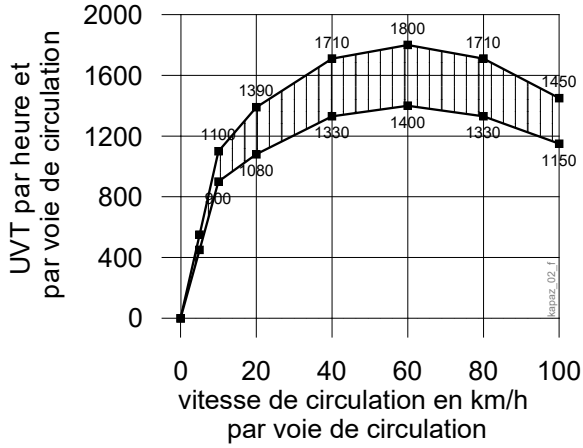

Fig. 7.3 Capacité des tunnels à trafic bidirectionnel.

7.1.2 Valeurs de dimensionnement pour la qualité de l'air

Dans le dimensionnement de la ventilation, on admettra pour la qualité de l'air dans l'espace de circulation, les valeurs suivantes (voir [13] et [15]) :

Fig. 7.4 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 fig. 9.1 page 39)

Concentration CO $c_{lim,CO}$ [ppm]	**Opacité $k_{lim,T}$** [m^{-1}]
60	0,005

7.1.3 Calcul des émissions

Le calcul des émissions de CO et de l'opacité générés 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 (PL) rassemble tous les véhicules d'une masse supérieure à 3.5 t comme les camionnettes, les autobus, les camions, les trains routiers ainsi que les semi-remorques ;
- Dans le cas des tunnels, le poids total moyen des poids lourds doit être évalué en fonction des quatre catégories de véhicules ci-dessous. Les indications relatives au poids total figurent dans [15] :
  - dans le trafic urbain 12 t ;
  - dans le trafic régional 18 t ;
  - dans le trafic national 22 t ;
  - dans le trafic de transit 70 % de poids admis.

7.1.4 Besoins en air frais

Afin de respecter les limites tant pour le CO que pour les matières opacifiantes, la quantité d'air frais nécessaire Q_{af} doit être déterminée pour tous les scénarios de trafic pris en considération.

Pour les tunnels bidirectionnels, les calculs tiendront compte de la répartition directionnelle du trafic suivante:

Fig. 7.5 Répartition directionnelle du trafic pour le calcul des besoins en air frais en cas de trafic bidirectionnel.

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

Le calcul des besoins en air frais est ensuite effectué en déterminant les émissions des véhicules selon l'annexe III.

Besoins en air frais relatifs aux émissions de CO

L'émission totale de CO sur la longueur du tunnel ou du tronçon de tunnel L_{tunnel} est:

$$E_{CO} = \left(n_{VT} \cdot e_{VT,CO} + n_{PL} \cdot e_{PL,CO}\right) / \, 3'600 \qquad [m^3/s] \qquad \text{Éq. 7.3}$$

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. Le calcul est effectué pour un trafic fluide, sur la base du THD déterminant. Lorsque le flux de trafic est perturbé, on effectuera le calcul sur la base de la capacité selon le chap. 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 diluer suffisamment les émissions de CO est de:

$$Q_{af,CO} = \frac{E_{CO}}{c_{lim,CO}} \cdot 10^6 \qquad [m^3/s] \qquad \text{Éq. 7.4}$$

avec $c_{lim,CO}$ en ppm selon figure 7.4.

Besoins en air frais nécessaires pour limiter l'opacité

L'émission totale de matières opacifiantes sur la longueur du tunnel ou du tronçon de tunnel L_{tunnel} est:

$$E_{op} = (n_{VT} \cdot e_{VT,op} + n_{PL} \cdot e_{PL,op}) / \, 3'600 \qquad [m^2/s] \qquad \text{Éq. 7.5}$$

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. Le calcul est effectué pour un trafic fluide, sur la base du THD déterminant. Lorsque le flux de trafic est perturbé, on effectuera le calcul sur la base de la capacité selon le chap. 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 diluer suffisamment l'opacité est la suivante :

$$Q_{af,op} = \frac{E_{op}}{k_{lim,op}} \qquad [m^3/s] \qquad \text{Éq. 7.6}$$

avec $k_{lim,op}$ en m^{-1} selon figure 7.4.

Besoin minimal en air frais

Pour des raisons de régulation de la ventilation, un débit minimal d'air frais $Q_{af,min}$ dépendant de la section de l'espace de circulation A_{tunnel} est requis.

$$Q_{af,min} = A_{tunnel} \cdot 1.5 \ m/s \qquad [m^3/s] \qquad \text{Éq. 7.7}$$

De plus, une ventilation longitudinale doit être dimensionnée de manière à permettre un renouvellement complet de l'air en 20 minutes.

Besoin déterminant en air frais

Le débit d'air frais nécessaire sera déterminé séparément pour chaque scénario de trafic. Il se calcule comme suit :

$$Q_{af} = MAX(Q_{af,CO}, Q_{af,op}, Q_{af,min}) \qquad [m^3/s] \qquad \text{Éq. 7.8}$$

7.1.5 Influences météorologiques et thermiques

La différence de pression Δp_{mt} due aux effets météorologiques et thermiques s'explique comme suit :

Différence de pression barométrique
Dans les tunnels percés à travers des chaînes de montagne, la différence de pression barométrique entre les portails peut atteindre plusieurs centaines de Pa et rester constante durant de longues périodes (heures, jours). Pour le dimensionnement, on utilisera 95 % de la valeur maximale constatée durant une période d'observation d'au moins une année et pour le sens le plus défavorable.

Indépendamment de l'emplacement du tunnel, il convient d'utiliser une valeur minimale de 5 Pa de différence de pression barométrique par kilomètre de distance entre portails.

Différence de pression due à la température
La température dans l'espace de circulation est généralement quasi constante, et se situe souvent quelques degrés 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 en s'appuyant sur la statistique des températures locales (*Éq. 7.19*). Pour le dimensionnement, on utilisera 95 % de la valeur maximale constatée durant une période d'observation d'au moins une année et pour le sens le plus défavorable.

Si on ne dispose pas de données locales enregistrées pour déterminer les flux d'air naturels, on peut appliquer les valeurs indicatives (percentiles 95) caractérisant l'écart de température entre l'espace de circulation et l'environnement:

- pour les tunnels sur le Plateau suisse: 1°C par 450 m de longueur.
- pour les tunnels alpins: 2°C par 450 m de longueur.

S'agissant des tunnels de plus de 5 km de long, des relevés spécifiques sont requis.

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

Le dimensionnement s'effectue en tenant compte de l'effet combiné des trois influences météorologiques.

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 :

$$\rho_L = 1.22 - 1.08 \cdot 10^{-4} \cdot H \qquad [\text{kg/m}^3] \qquad \textit{Éq. 7.9}$$

Pour l'alimentation électrique, on tiendra compte de la puissance nécessaire des ventilateurs pour les hautes densités d'air correspondant aux basses températures locales habituelles.

Données concernant les véhicules
La résistance au flux d'air, due à la surface moyenne d'une voiture et d'un camion, se calcule de la manière suivante :

$$\left(c_W \cdot A_{front}\right)_{VT} = 0.9 \qquad [\text{m}^2] \qquad \textit{Éq. 7.10}$$

$$\left(c_W \cdot A_{front}\right)_{PL} = 5.2 \qquad [\text{m}^2] \qquad \textit{Éq. 7.11}$$

L'effet de piston induit par le trafic sur l'air dans l'espace de circulation se calcule en effectuant la somme des différences de vitesse de chaque véhicule, par rapport à celle de l'air en circulation à l'endroit considéré.

$$\Delta p_{vhc} = \rho / 2 \cdot (v_{vhc} - v_{air})^2 \cdot (c_w \cdot A_{front})_{vhc} / A_{tunnel} \quad \text{[Pa]} \quad \text{Éq. 7.12}$$

$$\Delta p_{trafic} = \sum_{vhc} \Delta p_{vhc} \quad \text{[Pa]} \quad \text{Éq. 7.13}$$

Données relatives au tunnel (valeurs indicatives)

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

coefficient de perte à l'entrée du tube $\zeta_e = 0.6$ [-] Éq. 7.14

coefficient de perte à la sortie du tube $\zeta_s = 1.0$ [-] Éq. 7.15

coefficient de frottement du tube $k_s = 2$ [-] Éq. 7.16

(pour un anneau intérieur bétonné avec infrastructure usuelle, le coefficient de frottement correspondant, pour les tunnels à deux voies, est de λ = 0,015).

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

$$\Delta p_{frottement} = \rho / 2 \cdot v_{air}^{\ 2} \cdot (\zeta_e + \lambda \frac{L_{tunnel}}{D_h} + \zeta_s) \quad \text{[Pa]} \quad \text{Éq. 7.17}$$

Le cas échéant, on tiendra compte des pertes locales générées par exemple par des modifications de la section ou par des constructions en saillie.

7.1.7 Indications relatives aux systèmes sans aspiration

Les indications pour les cas de sinistre figurent au chap. 7.2.3.

La pression à fournir par les ventilateurs de jet $\Delta p_{néc}$ pour assurer les besoins en air frais Q_{af}, résulte de la somme des effets de piston dus au trafic, des pertes de pression du flux d'air le long du tunnel, ainsi que des contre-pressions dues aux facteurs météorologiques et thermiques. Les données nécessaires sont décrites aux chap. 7.1.5 et 7.1.6.

$$\Delta p_{néc} = \Delta p_{trafic} + \Delta p_{frottement} + \Delta p_{mt} \quad \text{[Pa]} \quad \text{Éq. 7.18}$$

Étant donné l'effet de ventilation généré par la circulation, le scénario de trafic nécessitant la plus grande quantité d'air frais n'est pas nécessairement celui qui exige la pression maximale par les ventilateurs de jet. Pour calculer la pression nécessaire, on fait varier la répartition directionnelle du trafic par pas de 20 % comme indiqué à la figure 7.5. La persistance d'un volume de trafic équivalent dans chaque sens de circulation n'est pas un cas de dimensionnement.

On tiendra compte de la vitesse maximale des poids lourds correspondant à la déclivité du tunnel, selon la figure 7.1. Le flux d'air généré par les ventilateurs doit être dirigé dans le sens de l'écoulement naturel afin de le renforcer.

Le système de ventilation peut propulser de l'air frais dans l'espace de circulation jusqu'à une vitesse maximum de 6 m/s dans les tunnels bidirectionnels, et 10 m/s dans les tunnels unidirectionnels ([14], page 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 indications pour les cas de sinistre figurent au chap. 7.2.4.

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 le dimensionnement de l'installation à l'aide des données de l'annexe VII.

Les gaines de ventilation doivent être accessibles à pied.

Apport d'air frais

Lorsqu'il est réparti sur toute la longueur du tunnel, l'air frais doit être injecté environ 50 cm au-dessus de la chaussée. Une injection par des ouvertures aménagées dans la dalle intermédiaire n'est pas admissible (voir chap. 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 s'effectue 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 de l'air vicié sortant du portail d'un tube dans l'autre tube. On observera les indications du chap. 7.2.6.

7.2 Dimensionnement pour l'exploitation en cas de sinistre

Les chapitres 7.2.1 et 7.2.2 donnent les indications permettant de dimensionner les installations de ventilations lors de leur exploitation en cas de sinistre. On trouvera par ailleurs, les directives relatives aux systèmes de ventilation mécanique eux même (chap. 7.2.3 à 7.2.6).

7.2.1 Sinistres de référence pour le dimensionnement des ventilations

L'AIPCR ([17], page 63) conclut, à partir de différentes sources, – parmi lesquelles les essais EUREKA 1998 [20] – que, lors d'un incendie, pendant un laps de temps significatif, on peut s'attendre aux puissances thermiques maximales indiquées ci-dessous :

Fig. 7.6 Puissances thermiques nominales lors d'incendies de différents véhicules selon [17]

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

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 7.6. L'essai EUREKA impliquant un semi-remorque, chargé de deux tonnes de meubles, a dégagé une puissance thermique maximale de 100 à 120 MW, cependant durant une très courte période [20].

Comparativement à la durée totale de l'incendie (une heure environ), la puissance thermique nominale est atteinte ou dépassée pendant seulement quelques minutes (voir [20] et [19]).

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

Par ailleurs, il y a lieu de prendre en compte des accidents lors desquels des substances dangereuses sont dégagées sans qu'il y ait d'incendie, c'est-à-dire avec une puissance thermique 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. 7.7 Sinistres de référence pour le dimensionnement d'une installation de ventilation.

Pour dimensionner les installations de ventilation, on considérera un incendie 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 chap. 7.1.5)

Dans les tunnels en pente, une pression sur l'air de l'espace de circulation apparaît dans la direction de l'axe du tunnel 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.

$$\Delta p_{nat} = (\rho_e - \rho_i) \cdot g \cdot L_{tunnel} \cdot Décl \qquad [Pa] \qquad \text{Éq. 7.19}$$

$$\Delta p_{incendie} = (\rho_i - \rho_{incendie}) \cdot g \cdot L_{incendie} \cdot Décl_{incendie} \qquad [Pa] \qquad \text{Éq. 7.20}$$

avec $\rho_n = \frac{p_{atm}}{R_L \cdot T_n}$ et *n = {i, e ou incendie}* [kg/m^3] *Éq. 7.21*

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

Les sinistres de référence pour le dimensionnement du système de ventilation sont caractérisés par les valeurs suivantes (cf. [19]) :

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

Fig. 7.8 Valeurs normalisées pour la détermination du courant ascendant (cf. fig. 7.9).

Les températures de référence indiquées dans [19], donnent le profil de courant ascendant illustré à la figure 7.9, lorsque l'écoulement atteint la vitesse critique et le tunnel a une pente constante. La courbe peut être adaptée aux autres situations (pente variable, sortie d'air à un portail, propagation symétrique).

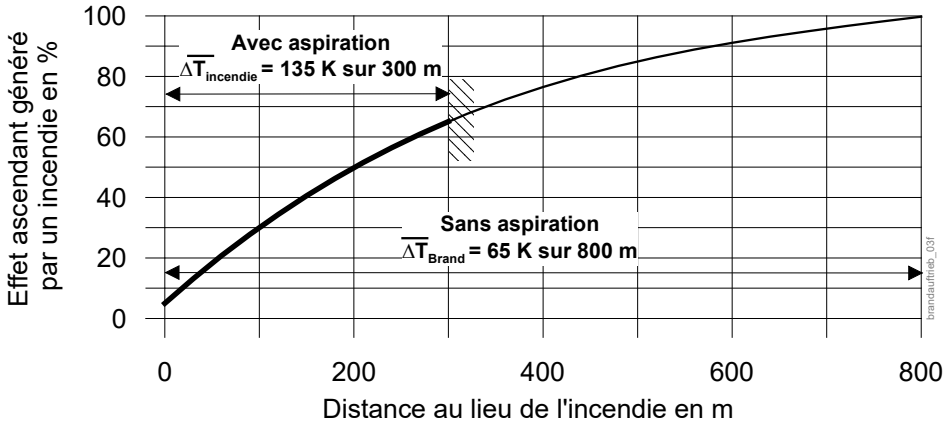

Fig. 7.9 Répartition locale du courant ascendant généré par un incendie, lorsque l'écoulement atteint la vitesse critique et le tunnel a une pente constante. Les tunnels dont la pente est variable nécessitent des calculs détaillés.

Pour le calcul des processus non stationnaire, 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, au vent ainsi qu'à la différence de température entre l'espace de circulation et le voisinage, on prendra les valeurs indiquées au chap. 7.1.5.

7.2.3 Indications relatives aux systèmes sans aspiration

7.2.3.1 Généralités

Dans les tunnels avec systèmes de ventilation sans 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 détermination de leur nombre et pour la pression nécessaire.

7.2.3.2 Exigences relatives au dimensionnement des ventilateurs de jet

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

Genre de trafic (chap. 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. 7.10 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 chap. 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 des ventilateurs de jet au régime adéquat, respectivement du programme adéquat 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 d'embouteillages (TU 2), on admettra une colonne de véhicules d'une longueur équivalant au moins aux 3/4 de la longueur du tunnel. Les influences météorologiques et thermiques sur l'écoulement longitudinal nécessaire découlent du chap. 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 les règles d'exploitation (chap. 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 dépend en particulier du genre de trafic et du volume momentané de celui-ci. Si des usagers sont à l'arrêt, de part et d'autre du sinistre (TB, cas échéant TU 2 ainsi que tube avec trafic bidirectionnel exceptionnel), il faut limiter l'écoulement longitudinal à l'endroit du sinistre afin de permettre aux usagers de fuir de chaque côté de celui-ci. L'exploitation des ventilateurs de jet doit permettre de régler la vitesse longitudinale d'écoulement de l'air en dehors de la zone du sinistre. Dans la zone où se trouvent 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 se trouvent d'un seul côté du sinistre (TU 1 et TU 2 avec trafic fluide), les ventilateurs de jet peuvent fonctionner sans autre réglage en soufflant dans le sens de circulation.

7.2.4 Indications relatives aux systèmes avec aspiration

7.2.4.1 Généralités

L'implantation de centrales de ventilation, respectera les conditions formulées dans la norme SIA 197/2 [11], chap. 8.10.

Pour les tunnels à deux tubes, les exigences minimales imposées par le chap. 7.2.4 doivent être satisfaites individuellement pour chaque tube. Des liaisons entre les canaux d'évacuation d'air de deux tubes parallèles, pouvant être fermées par des clapets, sont admises. Leur existence n'autorise pas un dimensionnement qui déroge aux exigences minimales.

En guise d'hypothèse de base pour le dimensionnement, on admettra une durée de 4 minutes entre le début du sinistre et le moment ou le scénario d'exploitation prévu pour l'extraction, atteint le régime adéquat.

Selon le chap. 1.2, les exigences s'appliquent aussi à l'assainissement de tunnels existants. La plus priorité maximale sera accordée à la quantité d'air extraite sur les 200 m de part et d'autre de l'incendie, au contrôle de l'écoulement longitudinal et pour satisfaire les exigences en cas de défaillance d'un ventilateur d'extraction.

7.2.4.2 Capacité d'extraction et influence sur l'écoulement longitudinal

La capacité d'extraction doit être dimensionnée, selon les sinistres de référence définis au chap. 7.2.1, pour maintenir les valeurs suivantes des écoulements longitudinaux dans l'espace de circulation. Les exigences s'appliquent à une section de l'espace de circulation avec dalle intermédiaire.

Genre de trafic (chap. 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. 7.11 Exigences minimales pour le dimensionnement et l'exploitation, posées à l'écoulement longitudinal dans la direction de l'endroit du sinistre pour des systèmes avec aspiration.

L'apport d'air frais Q_{ap} dans la zone où les gaz sont dégagés, c'est-à-dire dans la zone initialement la plus enfumée d'un incendie, doit être le plus faible possible et pris en compte pour déterminé le débit minimal d'air vicié. Pour respecter les valeurs prescrites dans la figure 7.11, il y a lieu d'assurer dans tous les cas, à l'endroit du sinistre, une extraction minimale $Q_{ae,min}$ de :

$$Q_{ae,min} = 3\ m/s \cdot A_{tunnel} + Q_{ap} \qquad [m^3/s] \qquad \textit{Éq. 7.22}$$

avec l'obligation de respecter la contrainte suivantes (voir figure 7.7):

$$Q_{ae,min} \geq \textit{débit volumique des gaz dégagés} + 20 + Q_{ap} \qquad [m^3/s] \qquad \textit{Éq. 7.23}$$

Les écoulements longitudinaux selon la figure 7.11 doivent être maintenus dans tous les cas et quelque soit le lieu du sinistre. Pour remplir ces exigences tout en tenant compte d'une marge de manœuvre suffisante pour le pilotage du système de ventilation, des ventilateurs de jet sont nécessaires dans l'espace de circulation. 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, de la complexité et de la configuration du tunnel. Pour les tunnels avec trafic unidirectionnel et faible fréquence d'embouteillages (TU 1), une augmentation de 1/10 x $Q_{ae,min}$ est suffisante. Pour les tunnels unidirectionnels à forte fréquence d'embouteillage (TU 2) et les tunnels avec trafic bidirectionnel (TB), il est nécessaire de fixer une augmentation égale à 1/3 x $Q_{ae,min}$. En présence de grandes déclivités et pour des configurations de tunnels avec des entrées et sorties supplémentaires, des considérations particulières sont nécessaires.

Le dimensionnement des ventilateurs d'extraction tiendra compte de la perméabilité des clapets d'évacuation en position fermée et de celle des canaux de ventilation Q_{fuites}.

$$Q_{ventilateur} = Q_{ae} + Q_{fuites} \qquad [m^3/s] \qquad \textit{Éq. 7.24}$$

Le problème de la perméabilité des canaux de ventilation est apparu avec la mise en service 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 aux éléments de construction. Les fuites des clapets de ventilation sont constituées par les flux d'air passant par les clapets fermés. Les fuites dues aux éléments de construction comprennent toutes les fuites des canaux d'évacuation, y compris l'air passant par les défauts d'étanchéité entre la construction et les châssis des clapets. Il faut noter que les fuites dues aux éléments de 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. L'annexe VII donne des indications sur l'estimation du volume total des fuites.

$Q_{ventilateur}$ est le débit volumique à déplacer, à la température ambiante, par le nombre de ventilateurs d'extraction prévus. Pour le cas particulier du dimensionnement à une température de l'air de 400°C (voir chap. 8.3.1), les ventilateurs d'extraction doivent être dimensionnés pour un débit d'air correspondant à *1.3 x* $Q_{ventilateur}$. En cas de changements de pression dues aux effets thermiques d'un incendie de 30 MW, il faut garantir une aspiration stable.

7.2.4.3 Genre de dispositif d'extraction des fumées

L'extraction des fumées doit s'effectuer à travers des 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.

Les tronçons proches des portails conviennent à la mise en place de ventilateurs de jet. Le début du canal d'évacuation ne doit pas être éloigné du portail de plus de 300 m.

Afin de limiter la quantité des gaz passant à côté de l'ouverture, la largeur des clapets de ventilation doit être aussi grande que possible. On tiendra compte à cet égard de la place nécessaire pour la circulation dans le canal d'extraction et pour le fonctionnement des clapets. Comme valeur indicative pour le dimensionnement de la surface des clapets, on peut admettre, à la température ambiante, pour tous les clapets ouverts dans le secteur de l'incendie, une vitesse verticale moyenne à travers l'ouverture de 15 m/s. Pour $Q_{ae} > Q_{ae,min}$, la vitesse d'écoulement de *15 m/s x* $Q_{ae}/Q_{ae,min}$ est admissible.

La section du canal de ventilation sera dimensionnée en tenant compte, des exigences aérauliques (pression requise pour le ventilateur d'extraction, sollicitation du canal, uniformité du débit extrait au-dessus des clapets ouverts). Dans le cas des nouvelles installations, la différence de pression entre l'espace de circulation et le canal ne doit pas dépasser 2'500 Pa.

La hauteur du canal doit garantir un accès suffisant aux clapets. La hauteur libre doit être d'au moins 1.80 m.

7.2.5 Analyse de scénarios

Comme indiqué aux chap. 7.2.3 et 7.2.4, l'installation de ventilation est dimensionnée de manière à être opérationnelle 3 à 4 minutes après le début du sinistre. Les effets d'un non-respect de ces conditions 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 système de commande et leur régulation, on tiendra compte des phénomènes d'instabilité au cours des 20 premières minutes qui suivent le début du 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, soit entre les ouvrages d'évacuation de l'air vicié et les prises d'air ou les portails, doit être évitée au moyen de mesures constructives appropriées. Dans les tunnels à deux tubes parallèles, il suffit généralement à cet effet, de séparer une zone d'évacuation de 100 m de long d'une zone d'aspiration de 30 m de long (fig. 7.12) par une cloison d'une hauteur équivalente à l'espace de circulation, ou de décaler les portails. En présence de portails en tranchée ou de hautes parois antibruit, on augmentera les dimensions en conséquence.

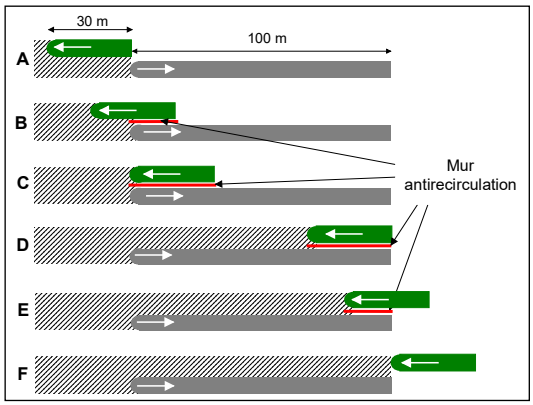

Fig. 7.12 Disposition de portails et cloisons destinés à éviter un court-circuit dans les flux d'air.

En cas de sinistre dans un tube, la ventilation de l'autre tube doit être exploitée de manière à éviter un court-circuit des flux d'air aux portails. A cet effet, il est nécessaire de fermer l'autre tube au trafic.

Pour garantir que deux tunnels successifs peuvent être considérés comme indépendants au niveau de la ventilation, la distance qui les sépare doit être d'au moins 100 m dans le cas de la traversée d'une vallée, de 200 m pour une route située dans une gorge profonde et de 250 m lorsqu'une galerie de protection ouverte relie les deux tunnels.

Le positionnement d'un orifice d'évacuation des fumées, nécessite le recours à l'orographie[1] et aux données météorologiques locales, le respect des conditions figurant au chap. 8.10.4 de la norme SIA 197/2 [11]. La distance entre cet orifice et le portail doit être de 50 m au minimum.

7.3 Exigences en cas de pannes et d'interruptions d'exploitation

Les deux cas de figure déterminants pour dimensionner la ventilation (panne d'un ventilateur d'extraction en cas de sinistre ainsi qu'interruptions de l'exploitation pendant les périodes d'entretien) sont décrits ci-après.

7.3.1 Pannes survenant pendant un sinistre

Ventilateurs d'extraction

En cas de panne d'un ventilateur d'extraction, le débit volumique de l'air extrait de l'espace de circulation doit au moins être égal à 65 % de Q_{ae} (*éq. 7.24*). L'exigence s'applique à

[1] L'orographie est un domaine spécial dans diverses sciences de la Terre. Elle s'occupe des structures du relief au-dessus de la surface naturelle de la Terre, et principalement du profil et de la disposition des chaînes de montagnes et des conditions d'écoulement des cours d'eau. L'adjectif orographique désigne des phénomènes, des propriétés et des relations liées aux déclivités et à l'orientation de versants de montagnes (exposition) du terrain et à ses cours d'eau.

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.

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 au moins s'élever à 90 % de la valeur de dimensionnement.

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 au moins s'élever à 90 % de la valeur de dimensionnement.

7.3.2 Interruptions de l'exploitation pendant les périodes d'entretien

Ventilateurs d'extraction

Interruptions d'exploitation de 72 heures au plus

Un débit d'air, équivalant à 65 % du débit volumique Q_{ae} (*éq. 7.24*), extrait par un seul ventilateur en service est admis pendant un maximum de 72 heures par année. Durant cette période, il y a lieu de mettre en œuvre des mesures propres à réduire le risque de sinistre.

Interruptions d'exploitation de plus de 72 heures

Si l'interruption d'exploitation d'un ventilateur d'extraction entraîne une réduction de débit de l'air extrait pendant plus de 72 heures par année, une estimation des risques encourus durant cette phase doit être effectuée. Des mesures propres à réduire les risques doivent être mises en oeuvre. Ces mesures peuvent être les suivantes:

1. Mesures relevant de l'exploitation et de l'organisation
   p.ex.: limitation de la vitesse des véhicules, service de piquet au sein de l'équipe d'intervention locale, déviation du trafic des poids lourds, déviation d'un sens de circulation dans les tunnels bidirectionnels, fermeture du tunnel.
2. Mesures au niveau de l'équipement.
   p.ex.: moteur de remplacement, augmentation du nombre des ventilateurs d'extraction.

Le choix des mesures appropriées doit être fait et documenté sur la base d'études appropriées (p.ex. analyse coûts/utilité).

7.4 Réduction des nuisances additionnelles à proximité des portails

7.4.1 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) [2]. Les émissions de NO_x des véhicules à moteur sont calculées selon les indications du manuel des coefficients d'émission du trafic routier [18].

L'aspiration de l'air du tunnel avant qu'il ne sorte par le portail, et son évacuation par une cheminée d'évacuation peuvent préserver les abords immédiats du portail d'une pollution supplémentaire par 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 7.13 nécessitent généralement des installations de ventilation destinées à réduire le débit d'air vicié sortant par le portail.

Fig. 7.13 Valeurs empiriques des charges polluantes de NO_x aux portails, au-delà desquelles des installations d'extraction sont à prévoir.

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

Pour le dimensionnement des cheminées d'évacuation, on veillera à ce que leur hauteur ainsi que la vitesse d'expulsion de l'air à leur débouché soient suffisantes (voir annexe V, page 61). 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 les nuisances moyennes sur une longue durée, l'installation de ventilation peut être pilotée en fonction des valeurs empiriques des courbes de variation du trafic. Il n'est pas opportun, pour piloter l'installation de ventilation, d'utiliser la mesure des concentrations des polluants dans la zone proche du tunnel.

L'énergie consommée pour la construction et l'exploitation de l'installation de ventilation est un paramètre écologique à prendre en considération dans le bilan global coûts/avantages. En l'état actuel des connaissances relatives aux nuisances provoquées par les polluants atmosphériques, compte tenu de la réduction des émissions des véhicules à moteur, ainsi que des priorités générales qui ont été définies (réduction des émissions à la source, réduction 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. La nécessité d'exploiter de telles installations de protection contre les immissions doit être confirmée périodiquement par des mesures.

7.4.2 Bruit des ventilateurs

L'appréciation des nuisances sonores est fondée sur l'ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) [1].

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

7.5 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 page 63.

7.6 Ventilation des locaux d'exploitation

Dans les locaux d'exploitation, les conditions relatives à la qualité, à la température et à l'humidité de l'air, prescrites pour les places de travail, 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, dans les locaux d'exploitation, une surpression par rapport à l'espace de circulation.

7.7 Documentation du dimensionnement

Le dimensionnement de la ventilation, son niveau d'équipement et son mode d'exploitation, doivent être documenté de manière à en assurer la traçabilité. Cette documentation comprendra en particulier les hypothèses 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 correspondre à l'état actuel de la technique [10] [11] et aux directives de l'OFROU [3] [5] [6] [7]. Il convient de tenir compte des indications figurant dans les manuels techniques de l'OFROU [8] et [9]. Par ailleurs, il y a lieu de respecter les règles suivantes :

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

Les exigences minimales énumérées ci-après sont applicables. L'annexe V 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

Généralités

En exploitation normale, la nécessité de ventiler est déterminée 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, des paramètres relatifs au trafic avant et dans le tunnel ou des valeurs empiriques décrivant son évolution.

Mesure d'opacité (voir aussi chap. 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 tube.

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, on prévoira au moins deux appareils par tube.

Mesure de l'écoulement d'air (voir aussi chap. 8.2.2)

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

Dans chaque tunnel doté d'une ventilation mécanique, la direction du flux d'air, son débit volumique ainsi que la vitesse moyenne d'écoulement dans l'espace de circulation seront mesurés, dans une section de mesure au moins, par tronçon de ventilation.

8.2.2 Cas de sinistre

Détection

Les tunnels dotés d'une ventilation mécanique doivent être équipés d'un système de détection d'accident et d'incendie. Sont déterminantes les prescriptions figurant dans la directive de l'OFROU relative à la détection d'incendie dans les tunnels routiers [5].

La détection des sinistres fera appel, de façon judicieuse et dans la mesure du possible, à tous les capteurs installés dans un tunnel, y compris l'installation vidéo (voir la directive OFROU [6] sur les installations vidéo).

Vitesse de détection et détection du lieu du sinistre

L'efficacité de l'installation de ventilation dépend de la rapidité de détection d'un sinistre (voir [5]). De plus, pour les systèmes dotés de clapets de ventilation télécommandés, la détermination du lieu du sinistre et la distinction entre incendies stationnaires et incendies en mouvement sont essentielles pour l'exploitation correcte de la ventilation.

Mesure de l'écoulement d'air

Conformément aux exigences des chap. 7.2.3.3 et 7.2.4.2, les mesures de la vitesse de l'air doivent faire partie du dispositif de commande, afin de permettre l'adaptation de l'écoulement de l'air dans l'espace de circulation en cas de sinistre. Si on utilise une mesure de l'écoulement d'air pour le pilotage en cas de sinistre, il faut pouvoir en déterminer la plausibilité par 3 mesures indépendantes.

8.2.3 Exigences

Exigences minimales posées au système et à la précision des mesures

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

Fig. 8.14 Exigences minimales pour les instruments de mesure

Grandeur mesurée	Domaine de mesure	Précision de la mesure (spécification instruments)
Vitesse de l'écoulement d'air		
- espace de circulation	-12 à +12 m/s	± 0.2 m/s à 3 m/s
- canaux, puits	selon disposition	± 5 % du résultat
Opacité (exploitation normale)	0 à 0.015 m^{-1}	± 0.001 m^{-1}
CO	0 à 250 ppm	0 à 60 ppm: ± 5 ppm 60 à 250 ppm: ± 15 ppm

Périodes déterminantes pour le calcul des valeurs moyennes

La durée des périodes pour le calcul des moyennes dans les systèmes de mesure utilisés pour détecter des sinistres ne doit pas excéder 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 durant 120 minutes à une température de 250°C. Lorsque le plus court chemin entre le premier clapet de ventilation et le ventilateur d'extraction est inférieur à 50 m, le fonctionnement du dispositif d'extraction doit être garanti durant 120 minutes pour une température de 400°C. Il y a lieu de s'assurer que les autres installations (situées p.ex. dans l'espace occupé par les ventilateurs) sont en mesure de fonctionner dans les mêmes conditions de température.

8.3.2 Ventilateurs de jet

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

8.3.3 Clapets de ventilation

Le fonctionnement des clapets de ventilation télécommandés, y compris leurs moteurs, les câblages exposés, etc., doit être garanti durant 120 minutes à une température de 250°C, dans l'espace de circulation et dans le canal d'extraction d'air.

8.4 Chemins de fuite

Lors d'un sinistre, la priorité principale est l'auto sauvetage des usagers. Les chemins de fuite permettent aux usagers se trouvant à l'endroit du sinistre de rejoindre un lieu sûr. Le but principal du système de ventilation est de maintenir les chemins de fuite exempts de gaz nocifs et de fumées.

Pour la conception, le dimensionnement et la signalisation des chemins de fuite, on se référera aux normes SIA 197 [10] et 197/2 [11], à la directive de l'OFROU « Ventilation des galeries de sécurité des tunnels routiers » [4] ainsi qu'à la directive de l'OFROU « Signalisation des dispositifs de sécurité dans les tunnels » [7].

9 Conditions d'exploitation

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

Les valeurs limites de concentration de CO et d'opacité indiquées à la figure 7.4 servent de base au dimensionnement de la ventilation. Pour le pilotage de l'installation, les valeurs d'enclenchement seront fixées de façon à respecter les valeurs de dimensionnement, en moyenne dans tout le tunnel pour le CO, et en chaque endroit du tunnel pour l'opacité.

Lorsque les valeurs indiquées à la figure 9.1 sont dépassées pendant plus de 3 minutes en un endroit quelconque de l'espace de circulation, l'accès au tube concerné doit être bloqué immédiatement.

Fig. 9.1 Valeurs limites déterminantes de la qualité de l'air dans l'espace de circulation, pour la fermeture du tunnel

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

9.2 Pilotage

9.2.1 Système de mesure et de détection

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

9.2.2 Ventilateurs de jet

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

9.2.3 Débits d'air vicié

Si des débits d'air vicié supérieurs à ceux exigés au chapitre 7.2.4 sont disponibles, il y a lieu de les exploiter en tenant compte des vitesses longitudinales maximales.

9.2.4 Apport d'air frais en cas de sinistre

L'arrivée d'air frais dans le secteur du sinistre est à supprimer ou à réduire. Cette diminution du débit d'air frais doit être compensée par une augmentation équivalente du débit d'extraction (cf. chap. 7.2.4). Dans les tronçons voisins, il peut être opportun d'amener de grands volumes d'air frais, et de synchroniser cet apport et l'extraction d'air vicié.

9.2.5 Clapets de ventilation télécommandés en exploitation normale

Au besoin, les clapets de ventilation télécommandés peuvent également être utilisés durant l'exploitation normale de la ventilation.

9.2.6 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, selon des scénarios préalablement définis, et en fonction de l'endroit ou survient le sinistre. Dans le cas de plusieurs alertes successives, il faut, en premier lieu, conserver le réglage automatique établi en fonction de la première alarme. Une modification automatique de l'ouverture des clapets n'est généralement pas judicieuse. La modification manuelle de l'ouverture des clapets et des ventilateurs doit être possible.

9.3 Traçabilité d’évènements particuliers

Toutes les mesures, significatives pour la ventilation, doivent être automatiquement archivées après chaque alarme incendie.

Pour permettre l'examen du sinistre et 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.

9.4 Alimentation sans coupure (UPS)

L'alimentation en 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 électriques indépendants. Leur exploitation via l’alimentation sans coupure (*UPS*) n’est pas envisageable.

10 Vérifications particulières

10.1 Exigences particulières pour les composants de l'installation

La ventilation est un système d'importance majeure pour la sécurité des usagers des tunnels. Pour cette raison, on utilisera des composants de haute qualité, simples, fiables et garantissant une sécurité d'exploitation élevée. Les éléments susceptibles de présenter un risque élevé en cas de disfonctionnement doivent être identifiés avec soin; ils sont si possible à éviter ou à installer de manière redondante. La puissance minimale de l'installation en cas de panne ou d'interruption d'exploitation est donnée par les exigences du chap. 7.3.

Le choix des composants électriques et électroniques du système de ventilation sera effectué de façon à assurer une haute disponibilité et un faible taux de panne. Le fonctionnement de chacun des éléments de la ventilation doit être périodiquement vérifié. Ces contrôles doivent être automatisés dans la mesure du possible. Les tests périodiques et les résultats attestant du bon fonctionnement des composants de l'installation doivent être enregistrés et documentés.

10.2 Mise en service de l'installation et instruction

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, basée sur des cas concrets, leur permettant de se familiariser avec l'installation.

Le personnel d'exploitation doit maîtriser la gestion de l'installation, que ce soit en mode automatique, manuel ou lors de tests des composants. Les opérateurs suivront une formation continue destinée à parfaire et entretenir leurs connaissances et à favoriser les échanges d'expériences entre eux.

10.3 Examen de la conception générale

Lorsque les conditions d'exploitation sont modifiées de façon importante, le système de ventilation sera réexaminé dans son ensemble. Ces modifications peuvent être, entre autres : de nouveaux modes de fonctionnement de la ventilation non prévus lors de son dimensionnement, des modifications significatives du volume de trafic et l'acquisition de nouvelles expériences suite à des sinistres.

11 Travaux de maintenance et d'entretien

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

Durant les travaux de maintenance et d'entretien, la qualité de l'air dans l'espace de circulation d'un tunnel doit être conforme aux valeurs prescrites par la SUVA. Il n'y a pas lieu de dimensionner l'installation d'un système de ventilation uniquement pour les travaux de maintenance et d'entretien. Lorsqu'aucun détecteur de CO n'est installé, le mode de fonctionnement de la ventilation durant les travaux de maintenance et d'entretien sera régler en fonction de l'expérience. Lorsque des travaux particuliers sont effectués pour la première fois, il est recommandé d'utiliser des détecteurs mobiles de CO.

11.2 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 divergentes doivent être documentées en se référant à ces manuels. Tous les composants essentiels pour garantir la sécurité de fonctionnement doivent être vérifiés, à intervalles appropriés, conformément aux indications figurant au chap. 10.1. Une attention particulière sera portée aux composants de la ventilation qui ne sont pas utilisés en exploitation normale.

Les composants importants sont notamment :

- Appareillage de détection et de mesure
  - Installation de détection incendie (détecteurs de fumée et détecteurs thermiques linéaires)
  - 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, les messages d'état des composants seront également testés (position des clapets, état des ventilateurs, etc.).

Annexes

I Abréviations, unités et glossaire 45
I.1 Abréviations 45
I.2 Unités 46

II Valeurs indicatives relatives aux prévisions de trafic 47
II.1 Évolution du trafic 47
II.2 Trafic horaire déterminant 47
II.3 Fréquence d'embouteillages 48

III Calcul des émissions 49
III.1 Bases 49
III.2 Émissions des voitures de tourisme 49
III.2.1 Équations de base 49
III.2.2 Émissions de CO des VT à moteur à essence 50
III.2.3 Émissions de matières opacifiantes des VT à moteur à essence 51
III.2.4 Émissions de CO des VT à moteur diesel 52
III.2.5 Émissions de matières opacifiantes des VT à moteur diesel 53
III.3 Émissions des poids lourds 54
III.3.1 Équations de base 54
III.3.2 Emissions de CO des PL 55
III.3.3 Émissions de matières opacifiantes des PL 56
III.4 Évolution des émissions de base en fonction du temps 57

IV Ventilateurs de jet 59
IV.1 Généralités 59
IV.2 Caractéristiques des ventilateurs 59
IV.3 Disposition 60

V Remarques relatives aux composants (liste de contrôle) 61

VI Données permettant d'optimiser le dimensionnement 63
VI.1 Généralités 63
VI.2 Amortissement du capital investi 63
VI.3 Charges moyennes 64
VI.4 Durée d'utilisation ou période considérée 64
VI.5 Intérêt du capital et renchérissement 65
VI.6 Prix de l'énergie 65
VI.7 Données nécessaires 66

VII Fuites 67
VII.1 Valeurs de référence 67
VII.2 Nomogramme pour l'estimation des pertes de pression 67

I Abréviations, unités et glossaire

I.1 Abréviations

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

Français	Allemand	Unité	Signification
alt	H	m	altitude
ASC	USV	-	alimentation sans coupure *Uninterruptible Power Supply (UPS)*
A_{tunnel}	A_{Tunnel}	m^2	section transversale de l'espace de circulation d'un tunnel
$c_{lim,CO}$	$c_{lim,CO}$	ppm	valeur de dimensionnement des émissions de CO
CO	CO	-	monoxyde de carbone
$c_w \cdot A_{front}$	$c_w \cdot A_{Front}$	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
$Décl_{incendie}$	LN_{Brand}	-	pente moyenne du segment $L_{incendie}$
D_h	D_h	m	diamètre hydraulique $D_h = 4 \cdot section / périmètre$
E_{CO}	E_{CO}	m^3/s	émissions totales de CO
EIE	UVP	-	étude d'impact sur l'environnement
E_{op}	E_T	m^2/s	émissions totales de matières opacifiantes
$e_{PL,CO}$	$e_{LW,CO}$	$m^3/(h,vhc)$	émissions spécifiques de CO d'un camion
$e_{PL,op}$	$e_{LW,T}$	$m^2/(h,vhc)$	émissions spécifiques de matières opacifiantes d'un camion
$e_{VT,CO}$	$e_{PW,CO}$	$m^3/(h,vhc)$	émissions spécifiques de CO d'une VT
$e_{VT,op}$	$e_{PW,T}$	$m^2/(h,vhc)$	émissions spécifiques de matières opacifiantes d'une VT
g	g	m/s^2	accélération de la pesanteur = 9.81 m/s^2
$k_{lim,op}$	$k_{lim,T}$	1/m	valeur de dimensionnement de l'opacité en tunnel
k_s	k_s	mm	rugosité des parois
$L_{incendie}$	L_{Brand}	m	tronçon 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
OFEV	BAFU	-	Office fédéral de l'environnement
OFROU	ASTRA	-	Office fédéral des routes
op	ST	1/m	opacité
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 (camion)
Q_{ae}	Q_{ABL}	m^3/s	débit volumique de l'air extrait (air vicié) par les clapets
$Q_{ae,min}$	$Q_{ABL,min}$	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
$Q_{af,CO}$	$Q_{FL,CO}$	m^3/s	débit d'air frais requis pour le CO
$Q_{af,min}$	$Q_{FL,min}$	m^3/s	débit d'air frais minimal nécessaire
$Q_{af,op}$	$Q_{FL,T}$	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
$Q_{ventilateur}$	$Q_{Ventilator}$	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
TB	GV	-	trafic bidirectionnel

Français	Allemand	Unité	Signification
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)
TU 1	RV 1	-	trafic unidirectionnel avec faible fréquence d'embouteillages
TU 2	RV 2	-	trafic unidirectionnel avec forte fréquence d'embouteillages
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	pression verticale ascendante due à l'incendie dans le tronçon $L_{incendie}$
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
°C	température
1/m	opacité
J = W·s	capacité calorifique, travail, énergie
K	différence de température ou température absolue
kg/m^3	densité
m^2/s	émissions de matières opacifiantes, viscosité de l'air
m^3/s	débit volumique
N = kg·m/s^2	force, poussée
Pa = N/m^2	pression
ppm, mg/m^3, µg/m^3	concentration
W = J/s	puissance

II Valeurs indicatives relatives aux prévisions de trafic

Les données nécessaires relatives au trafic sont décrites aux chap. 5.2 et 7.1.1.

Si, dans les premières phases d'un projet, on ne dispose pas de toutes les données relatives au trafic, on peut utiliser, pour le dimensionnement de la ventilation exclusivement, les valeurs indicatives figurant dans cette annexe. Pour les phases suivantes, on utilisera obligatoirement des données issues d'études détaillées du trafic.

II.1 Évolution du trafic

Pour caractériser 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 [12])	7	classe 4	18

* à partir et à destination de lieux de vacances.

Fig. II.1 Genres de déplacements en fonction des types et classes selon [12], chiffre 5 et trafic horaire déterminant par genre de déplacement. L'indication du THD repose sur les données de [12] pour les moyennes de la 30ème heure.

Le 75 % de la part des poids lourds au TJM peut être admis comme part des PL au THD.

II.3 Fréquence d'embouteillages

Pour les tunnels unidirectionnels et pour les prévisions de bouchons on distingue entre une fréquence d'embouteillages forte ou faible (chap. 6.1). Les données de la figure II.2 ont valeur indicative.

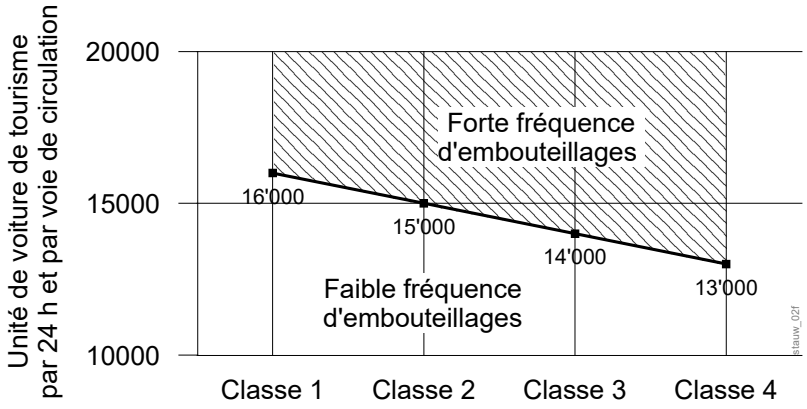

Fig. II.2 Tunnels unidirectionnels : fortes et faibles fréquences d'embouteillages selon [12], en l'absence de prévisions. Les UVT se rapportent aux TJM et aux taux moyens de poids lourds. Les classes se rapportent aux genres des déplacements selon la figure II.1. La limite entre les deux zones peut être 20 % plus basse si les voies de circulation se rejoignent dans le tunnel ou à proximité. 1 PL ≙ 2 UVT.

III Calcul des émissions

III.1 Bases

En complément aux chap. 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 ST des voitures de tourisme (VT) et des poids lourds (PL). Les valeurs d'émission sont valables pour le dimensionnement des installations de ventilation des tunnels. Elles sont basées sur les valeurs de l'AIPCR [16] qui sont disponibles jusqu'en 2035. La variation des valeurs d'émission au-delà de l'année 2035 repose sur les indications de proportion des types de propulsion selon le manuel des facteurs d'émission HBEFA (MICET), version 4.2 [18].

III.2 Émissions des voitures de tourisme

Les données relatives aux émissions des voitures de tourisme **sont** également **applicables** aux camionnettes d'**un poids inférieur ou égal à 3.**5 tonnes.

III.2.1 Équations de base

Les émissions moyennes d'une voiture de tourisme e_0 se calcule avec :

$$e_{VT,CO} = a_{VT,B} \cdot (e_0 \cdot f_t \cdot f_{alt})_{VT,B,CO} + a_{VT,D} \cdot (e_0 \cdot f_t \cdot f_{alt})_{VT,D,CO} \quad \textit{Éq. III.1}$$

$$e_{VT,OP} = a_{VT,B} \cdot (e_0 \cdot f_t \cdot f_{alt})_{VT,V,ST} + a_{VT,D} \cdot (e_0 \cdot f_t \cdot f_{alt})_{VT,D,ST} + 1 \cdot q_{AR,VT} \quad \textit{Éq. III.2}$$

e_0 *valeur* de base des émissions à l'échappement pour chaque substance polluante et pour chaque moyen de propulsion, en fonction de la vitesse du véhicule et de la déclivité de la route, m^3CO/(h,vhc) resp. m^2/(h,vhc). La valeur de base se rapporte à l'année 2018 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

$a_{VT,B}$ part des véhicules à essence VT_B au trafic des véhicules de tourisme VT

$a_{VT,D}$ part des véhicules diesel VT_D au trafic des VT

$a_{VT,E}$ part des véhicules exclusivement électriques VT_E au trafic des VT

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

$e_{VT,OP}$ émissions de matières opacifiantes moyenne (moteur)(d'un VT en m^2/(h,vhc)

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

Année	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
$a_{VT,B}$	56	51	47	41	32	22	14	8	5
$a_{VT,D}$	43	46	43	36	27	18	11	6	3
$a_{VT,E}$	1	3	10	23	41	60	75	86	92

Fig. III.1 Part des VT en fonction du moyen de propulsion $a_{VT,B}$, $a_{VT,D}$ et $a_{VT,E}$ en % du trafic moyen de VT sur le réseau des routes nationales selon MICET [18]

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	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049
10	0.0070	0.0080	0.0088	0.0100	0.0109	0.0128	0.0151
20	0.0076	0.0093	0.0114	0.0141	0.0207	0.0322	0.0456
30	0.0070	0.0084	0.0101	0.0125	0.0157	0.0208	0.0283
40	0.0075	0.0094	0.0118	0.0149	0.0203	0.0302	0.0444
50	0.0081	0.0107	0.0127	0.0166	0.0216	0.0301	0.0424
60	0.0078	0.0104	0.0121	0.0165	0.0230	0.0344	0.0539
70	0.0090	0.0121	0.0163	0.0233	0.0331	0.0549	0.0991
80	0.0113	0.0148	0.0192	0.0281	0.0452	0.0810	0.1511
90	0.0106	0.0143	0.0206	0.0324	0.0614	0.1328	0.2403
100	0.0141	0.0190	0.0287	0.0458	0.0781	0.1904	0.3779
110	0.0243	0.0302	0.0431	0.0710	0.1351	0.2966	0.7193
120	0.0429	0.0499	0.0674	0.1188	0.2362	0.5495	1.3693
130	0.0776	0.0966	0.1293	0.2151	0.4585	1.1988	2.3352

Fig. III.2 Valeur de base des émissions de CO e_0 des VT_B en $m^3/(h,vhc)$, année 2018.

Année	**2018**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2045**	**2050**	**2055**	**2060**
f_t	1.00	0.91	0.78	0.71	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69

Fig. III.3 Coefficient de temps f_t pour les émissions de CO des VT_B.

f_{alt}	**Altitude**		
Année	≤ 1000	1500	≥ 2000
2018	1.0	1.5	2.0
2020	1.0	1.3	1.6
2025 et après	1.0	1.0	1.0

Fig. III.4 Coefficient d'altitude f_{alt} pour les émissions de CO des VT_B.

La quantité de CO contenue dans l'air entrant dans le tunnel peut être négligée.

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

V_{vhc} [km/h]	Déclivité						
	- 6 %	**- 4 %**	**- 2 %**	**0 %**	**2 %**	**4 %**	**6 %**
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.17	0.20
20	0.12	0.13	0.14	0.16	0.19	0.24	0.31
30	0.13	0.13	0.15	0.17	0.22	0.30	0.41
40	0.17	0.16	0.17	0.20	0.27	0.37	0.50
50	0.21	0.19	0.19	0.23	0.32	0.43	0.59
60	0.21	0.19	0.20	0.28	0.42	0.63	0.93
70	0.24	0.22	0.25	0.34	0.52	0.88	1.48
80	0.24	0.28	0.29	0.47	0.79	1.30	2.41
90	0.33	0.29	0.32	0.56	1.16	2.08	3.80
100	0.47	0.35	0.44	0.72	1.48	2.93	4.94
110	0.71	0.58	0.71	1.10	2.03	3.71	6.16
120	0.96	0.95	1.27	2.01	3.27	5.04	7.95
130	1.26	1.63	2.29	3.67	5.85	7.89	10.41

Fig. III.5 Émissions de base des matières opacifiantes e_0 des VT_B en $m^2/(h,vhc)$, année 2018.

Année	**2018**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2045**	**2050**	**2055**	**2060**
f_t	1.00	0.98	0.95	0.93	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92

Fig. III.6 Coefficient de temps f_t pour les émissions de CO des VT_B.

f_{alt}	**Altitude**
Année	toutes les altitudes
2018 et après	1.0

Fig. III.7 Coefficient d'altitude f_{alt} pour les émissions de matières opacifiantes des VT_B.

La quantité de matières opacifiantes contenue dans l'air entrant dans le tunnel peut être négligée.

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 tous les VT et restent constantes. Les valeurs s'appliquent au trafic unidirectionnel et au trafic bidirectionnel.

V_{vhc} [km/h]	0	10	20	30	40	50	60
$q_{ar,VT}$ [m^2/(h,vhc)]	0	0.9	1.8	2.7	3.6	4.5	5.4

70	80	90	100	110	120	130
6.3	7.2	8.1	9.0	9.9	10.8	11.7

Fig. III.8 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	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
20	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
30	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
40	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5
50	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6
60	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.9
70	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.9	1.5
80	0.2	0.3	0.3	0.5	0.8	1.3	2.4
90	0.3	0.3	0.3	0.6	1.2	2.1	3.8
100	0.5	0.3	0.4	0.7	1.5	2.9	4.9
110	0.7	0.6	0.7	1.1	2.0	3.7	6.2
120	1.0	0.9	1.3	2.0	3.3	5.0	8.0
130	1.3	1.6	2.3	3.7	5.8	7.9	10.4

Fig. III.9 Valeur de base des émissions de CO e_0 des VT_D en $m^3/(h,vhc)$, année 2018.

Année	**2018**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2045**	**2050**	**2055**	**2060**
f_t	1.00	0.92	0.80	0.74	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72

Fig. III.10 Coefficient de temps f_t pour les émissions de CO des VT_D.

f_{alt}	**Altitude**
Année	toutes les altitudes
2018 et après	1.0

Fig. III.11 Coefficient d'altitude f_{alt} pour les émissions de CO des VT_D.

La quantité de CO contenue dans l'air entrant dans le tunnel 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	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
10	1.10	1.21	1.33	1.48	1.64	1.82	2.02
20	1.13	1.29	1.51	1.77	2.04	2.34	2.70
30	1.13	1.35	1.64	1.97	2.29	2.69	3.11
40	1.17	1.44	1.84	2.32	2.83	3.42	3.95
50	1.22	1.54	2.04	2.67	3.37	4.16	4.79
60	1.27	1.61	2.11	2.82	3.75	4.87	5.95
70	1.29	1.76	2.46	3.23	4.25	5.31	7.04
80	1.30	1.89	2.76	3.81	5.34	6.56	8.58
90	1.53	2.22	3.23	4.56	6.52	8.22	9.70
100	2.00	2.63	3.75	5.64	7.64	9.38	10.65
110	2.70	3.52	4.66	6.57	8.88	10.48	11.68
120	3.45	4.60	6.26	7.95	9.65	11.21	12.47
130	4.33	6.25	8.15	9.90	11.11	12.61	14.06

Fig. III.12 Émissions de base de matières opacifiantes e_0 à l'échappement des VT_D en $m^2/(h,vhc)$, année 2018.

Année	**2018**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2045**	**2050**	**2055**	**2060**
f_t	1.00	0.76	0.44	0.33	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31

Fig. III.13 Coefficient de temps f_t pour les émissions de base de matières opacifiantes à l'échappement des VT_D.

f_{alt}	**Altitude**
Année	toutes les altitudes
2018 et après	1.0

Fig. III.14 Coefficient d'altitude f_{alt} pour les émissions de matières opacifiantes des VT_D.

La quantité de matières opacifiantes contenue dans l'air entrant dans le tunnel peut être négligée.

L'apport des matières opacifiantes produites par l'abrasion et la « resuspension », $q_{ar,VT}$, est identique pour les VT diesel, à essence et électrique. Les valeurs sont tirées de la Fig. III.8.

III.3 Émissions des poids lourds

Les données relatives aux émissions des poids lourds s'appliquent aux véhicules d'un poids total > 3,5 tonnes.

III.3.1 Équations de base

Les émissions de CO et de de matières opacifiantes d'un poids lourd se calculent selon la formule suivante :

$$e_{\mathrm{PL},CO} = a_{\mathrm{PL,D}} \cdot (e_0 \cdot f_t \cdot f_{alt} \cdot f_M)_{\mathrm{PL},CO} \qquad \text{Gl. III.3}$$

$$e_{PL,ST} = a_{\mathrm{LPL,D}} \cdot (e_0 \cdot f_t \cdot f_{alt} \cdot f_M)_{\mathrm{PL},ST} + 1 \cdot q_{\mathrm{AR,PL}} \qquad \text{Gl. III.4}$$

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 2018, à un trajet accompli à l'altitude zéro avec un véhicule de 23 t.

$a_{PL,D}$ part des PL diesel au trafic des PL

$a_{VT,E}$ part des PL électriques au trafic des PL

f_t coefficient de temps par substance polluante

f_{alt} coefficient d'altitude par substance polluante

f_M facteur de masse par substance polluante

$e_{PL,CO}$ 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)

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

Année	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
$a_{PL,D}$	100	99	96	92	89	85	80	71	54
$a_{PL,E}$	0	1	4	8	11	15	20	29	46

Fig. III.15 Part des VT en fonction du moyen de propulsion $a_{PL,D}$ et $a_{PL,E}$ en % du trafic moyen de PL sur le réseau des routes nationales selon MICET [18])

III.3.2 Emissions de CO des PL

v_{vhc} [km/h]	Déclivité						
	- 6 %	**- 4 %**	**- 2 %**	**0 %**	**2 %**	**4 %**	**6 %**
0	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035
10	0.0106	0.0128	0.0157	0.0191	0.0221	0.0255	0.0284
20	0.0091	0.0104	0.0162	0.0202	0.0239	0.0278	0.0320
30	0.0079	0.0092	0.0166	0.0217	0.0278	0.0343	0.0384
40	0.0053	0.0079	0.0171	0.0245	0.0339	0.0437	0.0500
50	0.0037	0.0056	0.0175	0.0267	0.0393	0.0516	0.0589
60	0.0032	0.0056	0.0180	0.0317	0.0484	0.0566	0.0616
70	0.0033	0.0055	0.0184	0.0367	0.0574	0.0616	0.0642
80	0.0033	0.0055	0.0189	0.0416	0.0666	0.0702	0.0697
90	0.0033	0.0055	0.0202	0.0427	0.0688	0.0755	0.0749
100	0.0033	0.0055	0.0202	0.0450	0.0710	0.0806	0.0800

Fig. III.16 Émissions de base de CO e_0 des PL en m_3/(h,vhc), année 2018.

Année	**2018**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2045**	**2050**	**2055**	**2060**
f_t	1.00	0.89	0.76	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72

Fig. III.17 Coefficient de temps f_t pour les émissions de CO des PL.

f_{alt}	**Altitude**
Année	toutes les altitudes
2018 et après	1.0

Fig. III.18 Coefficient d'altitude f_{alt} pour les émissions de CO des PL.

Masse [t]	**≤12**	**15**	**23**	**28**	**32**
f_M	0.875	0.9	1.0	1.1	1.2

Fig. III.19 Coefficient de masse f_M pour les émissions de CO des PL.

La quantité de CO contenue dans l'air entrant dans le tunnel peut être négligée.

III.3.3 Émissions de matières opacifiantes des PL

V_{vhc} [km/h]	Déclivité						
	- 6 %	**- 4 %**	**- 2 %**	**0 %**	**2 %**	**4 %**	**6 %**
0	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
10	4.3	4.9	5.6	6.3	7.1	7.9	8.6
20	3.7	4.3	5.6	6.5	7.4	8.5	9.6
30	3.5	4.1	5.6	6.8	8.4	9.9	11.3
40	3.3	3.9	5.8	8.0	10.5	12.9	15.0
50	3.1	3.7	5.8	8.6	11.9	14.9	17.5
60	3.1	3.7	6.0	9.3	14.3	19.3	22.6
70	3.1	3.8	6.3	10.1	16.7	23.6	27.7
80	3.3	3.7	6.6	12.3	19.4	28.0	32.8
90	3.5	3.9	6.6	14.4	21.7	28.5	33.1
100	3.5	3.9	6.8	15.0	23.0	29.4	33.3

Fig. III.20 Émissions de base de matières opacifiantes e_0 à l'échappement des PL en $m^2/(h,vhc)$, année 2018.

Année	**2018**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2045**	**2050**	**2055**	**2060**
f_t	1.00	0.96	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91

Fig. III.21 Coefficient de temps f_t pour les émissions de matières opacifiantes à l'échappement des PL.

f_{alt}	***Altitude***
Année	*toutes les altitudes*
2018 et après	*1.0*

Fig. III.22 Coefficient d'altitude f_{alt} pour les émissions de matières opacifiantes à l'échappement des PL.

Masse [t]	**12**	**15**	**23**	**28**	**32**
f_M	0.875	0.9	1.0	1.1	1.2

Fig. III.23 Coefficient de masse f_M pour les émissions de matières opacifiantes à l'échappement des PL.

La quantité de matières opacifiantes contenues dans l'air entrant dans le tunnel peut être négligée.

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

V_{vhc} [km/h]	**0**	**5**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
$q_{Aar,PL}$ [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. III.24 Émissions de matières opacifiantes non dues aux moteurs des PL.

Les émissions de matières opacifiantes dues non pas aux moteurs mais produites par l'abrasion et la « resuspension », $q_{ar,PL}$ sont les mêmes pour les PL à moteur électrique et les PL à moteur diesel.

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

Les figures *III.25* à III.28 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 ; gris clair : valeurs jusqu'à la version 2.03, noir : nouvelles valeurs. Les émissions de matières opacifiantes produites non par les moteurs mais par l'abrasion et la « resuspension », $q_{ar,PL}$ sont les mêmes pour les vhc à moteur électrique et les vhc à moteur à essence et diesel.

Les valeurs dans les figures *III.25* à III.28 sont données à titre d'information. Dans les calculs de ventilation, on utilisera les valeurs indiquées aux figures III.1 à III.24.

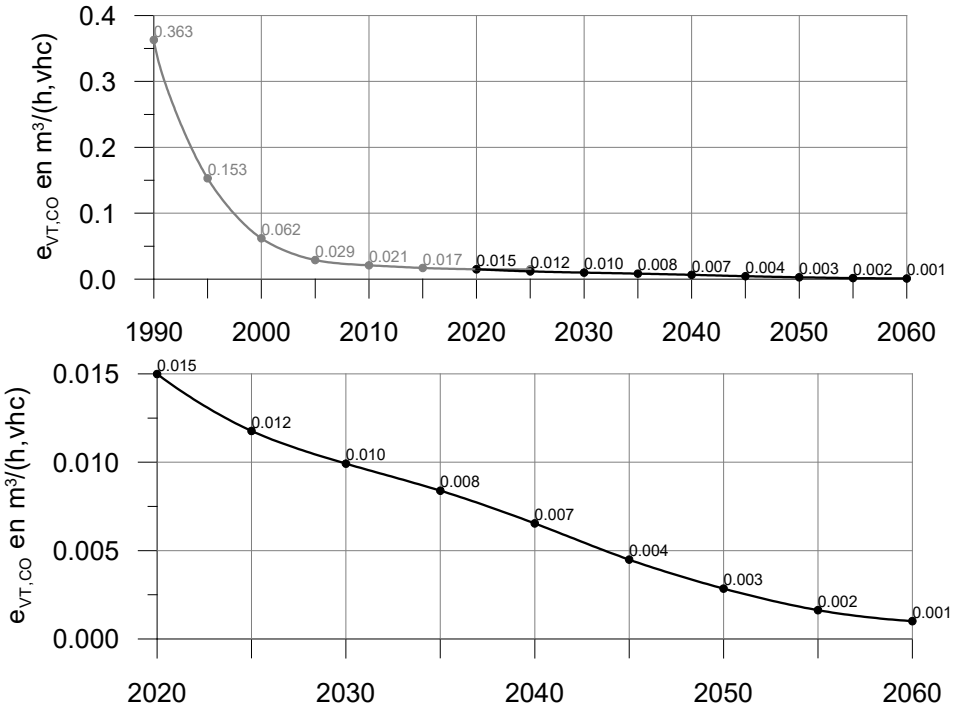

Fig. III.25 Évolution des émissions moyennes de CO d'un VT.

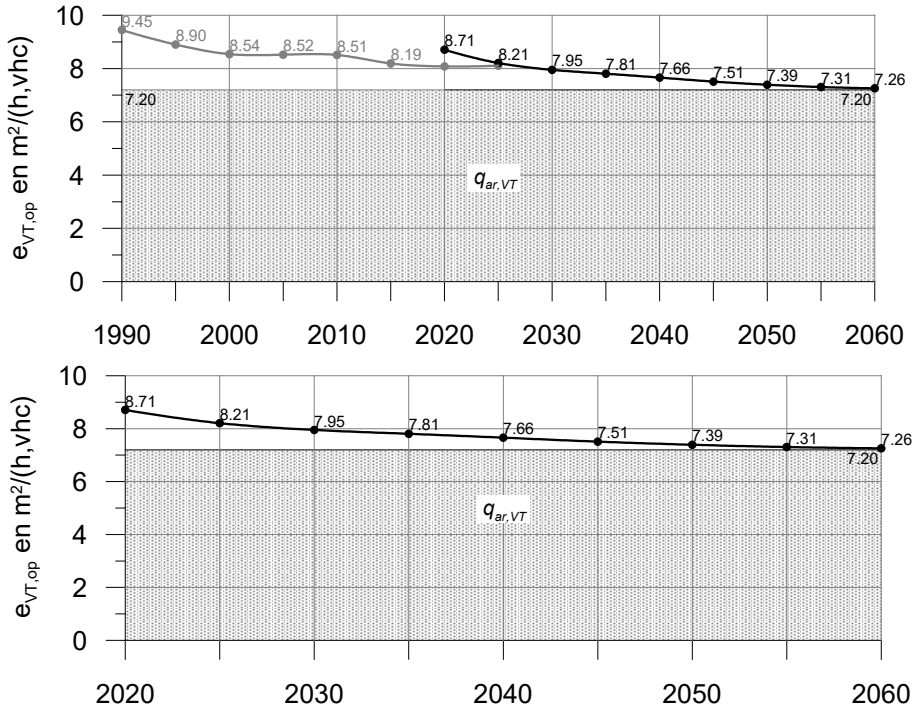

Fig. III.26 Évolution des émissions moyennes de matières opacifiantes d'un VT.

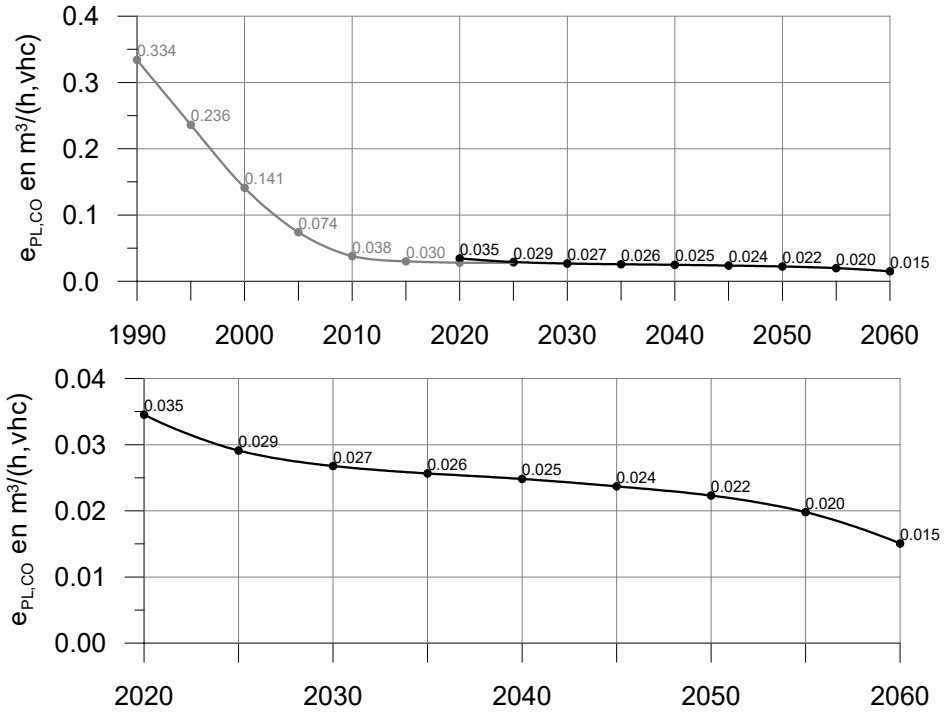

Fig. III.27 Évolution des émissions de CO d'un PL de 18 t.

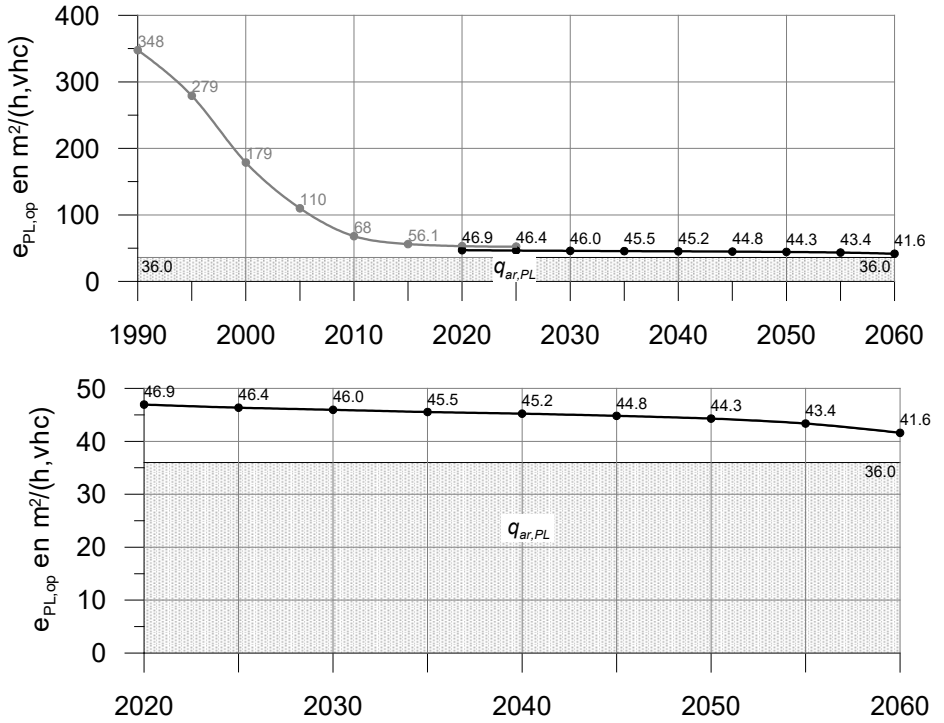

Fig. III.28 Évolution des émissions de matières opacifiantes d'un PL de 18 t.

IV Ventilateurs de jet

IV.1 Généralités

Pour déterminer le type de ventilateur, on tiendra compte de l'espace disponible dans le tunnel ainsi que d'autres paramètres tels que la longueur des câbles, l'entretien, la présence d'autres ventilateurs existants.

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

$$n_{vj} = \frac{\Delta p_{néc}}{\Delta p_{vj}} \qquad \textit{Éq. IV.1}$$

avec :

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

$\Delta p_{néc}$ 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* / ($\rho_{air} \cdot v_{jet} \cdot Q_{vj}$))
A_{tunnel} section de l'espace de circulation du tunnel en m^2

IV.2 Caractéristiques des ventilateurs

Pour déterminer le nombre de ventilateurs de jet nécessaires ont se référera aux caractéristiques principales ci-dessous. Il est à noter que les valeurs effectives varient selon le fabricant ; il est dès lors important de déterminer le nombre définitif de ventilateurs de jet, en fonction des 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 m/s*	V_{air} = 1.5 m/s	V_{air} = 3.0 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 opposés 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. IV.1 Valeurs caractéristiques de quelques ventilateurs de jet :
Δp_{vj} valable avec ρ_{air} = 1,2 kg/m^3, A_{tunnel} = 60 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 d'autres éléments situés dans la section du tunnel et en fonction de la position des sorties de secours. La distance longitudinale minimale entre des ventilateurs devrait être de l'ordre de 100 m et de 80 m entre les premiers et le portail. Si un groupe de ventilateurs est exclusivement exploité en poussant l'air vers l'intérieur du tunnel, sa distance au portail peut être réduite à 10 m. Si des déflecteurs de jet sont nécessaires, des niches à ventilateurs peuvent être réalisées à l'aide de parois verticales. Les pertes en termes d'écoulement et de rendement doivent être prises en considération.

Dans tous les cas, une distance de sécurité supplémentaire de 30 cm doit être garantie entre les ventilateurs de jet montés au-dessus des voies de circulation et le gabarit d'espace libre[2]. La distance entre l'enveloppe des ventilateurs de jet et les dalles doit être 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.

Le dimensionnement des ventilateurs de jet obéit aux dispositions des chap. 7.1 et 7.2.

[2] En principe, 4.80 m au-dessus de la chaussée.

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/Δp 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 ± 10 % sur Δp et Q, et de l'instabilité lors de la mise en marche
	Résistance à la température	Le cas d'incendie est déterminant pour les ventilateurs d'extraction, voir chap. 8.3
	Accessibilité pour entretien et remplacement	[11], chap. 8.10.2
	Émissions de bruit / silencieux	Observer les exigences de l'OPB [1] 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, assurage contre les chutes	Prendre des mesures de protection lorsque les ventilateurs sont placés dans des niches latérales
	Émissions de bruit / silencieux	Observer les exigences de l'OPB [1] et de l'EIE
	Amortissement des vibrations	
	Protection contre la corrosion	
Gaines d'apport et d'évacuation	Possibilité de les parcourir à pied	Chap. 7.2.4.3
	Étanchéité appropriée à l'air	Tenir compte des pertes lors du dimensionnement, à vérifier périodiquement (p.ex. automatisé par une mesure normée de l'écoulement dans la gaine)
	Étanchéité à l'eau des gaines situées en dessous	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	
Clapets de ventilation	En l'absence d'alimentation électrique, maintient dans la position en cours	
	Étanchéité à l'air	Tenir compte des pertes lors du dimensionnement. Vérifier périodiquement l'étanchéité
	Entraînement et câbles électriques protégés de la chaleur	En les disposant, p.ex. dans la gaine d'apport d'air ou par une isolation thermique (cf. chap. 8 Équipement)
	Test de fonctionnement automatisé	
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	Observer les exigences de l'OPB [1] et de l'EIE

Composant	**Exigences**	**Remarques**
Cheminée d'aération (cheminée de protection contre les immissions, évacuation des fumées)	Examiner les conditions de propagation sur le site ; distance minimale aux portails 50 m	Observer les prescriptions de l'Opair [2] et de l'OPB [1] resp. de l'EIE
	Vitesse de l'écoulement d'air à la sortie 7 – 18 m/s	Tenir compte du fonctionnement en régime partiel
	Cheminée de protection contre les immissions (exploitation>200 h/an) : Hauteur au moins 10 m au-dessus du terrain ou 3 m au-dessus du couronnement des arbres ; Evacuation des fumées (exploitation< 200 h/an) : 3 m au-dessus du terrain suffisent si la distance aux bâtiments est suffisante (env. 50 m)	Observer les prescriptions de l'Opair [2], resp. de l'EIE

VI Données permettant d'optimiser le dimensionnement

VI.1 Généralités

Les coûts d'investissements et les charges d'exploitation constituent un critère essentiel pour l'évaluation de différentes solutions. Les règles décrites ci-après permettent d'uniformiser les calculs effectués afin d'en connaître leur valeur.

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 un calcul d'investissements (p.ex. la méthode des annuités). En l'occurrence, on convertit les coûts des investissements en tranches annuelles constantes sur toute la durée d'utilisation des infrastructures et on les multiplie par le nombre d'annuité. Les charges annuelles JK dues peuvent être directement reprises si elles sont constantes. Dans le cas contraire, on en calculera la moyenne sur la durée d'utilisation. En général, le calcul se fait avec les valeurs réelles. Les coûts totaux correspondant sont :

$$GK = KK + JK \qquad \textit{Éq. VI.1}$$

GK coûts totaux annuels moyens

KK charges annuelles moyennes du capital

JK charges annuelles moyennes

Les conditions financières actualisées, 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 en 1999.

La directive OFROU « Élaboration des projets et construction des ouvrages d'art des routes nationales » [3] 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 constants pendant toute la durée d'utilisation ou la période considérée, on obtient l'équation suivante :

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

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 (taux réel)

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. VI.1 facteur d'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 :

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

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

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

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

Si $t = p$, alors

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

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. VI.2 Facteurs de pondération moyens pour p = 3 % et t = 2 % (exemple, autres valeurs selon l'équation VI.4, resp. 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 VI.3 propose des exemples de durées d'utilisation et de coûts d'entretien de différents composants.

	Composant	**Durée d'utilisation** ***ND*** [années]	**Coûts d'entretien** ***UK*** [% 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
Gaines de ventilation	métalliques	40	6
	dalle intermédiaire en béton armé	60	6
	autres ouvrages en béton armé	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
Déflecteurs		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. VI.3 Exemples de durées d'utilisation et de coûts d'entretien annuels.

VI.5 Intérêt du capital et renchérissement

Dans les calculs de rentabilité, on peut appliquer, à long terme, un taux d'intérêt moyen sur capital *p = 3 %* et un renchérissement moyen *t = 2 %*.

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, dans les calculs de rentabilité on applique les prix de l'électricité indiqués dans le tableau VI.4.

Agent énergétique	**Prix de base**	**Supplément**	**Prix total actuel**
Electricité			
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. VI.4 Prix de l'énergie avec suppléments comptables (état 2007).

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 effectués selon les règles ci-dessus doivent être vérifiables. Les données suivantes doivent apparaître :

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*.

Le calcul des investissements doit être optimisé pour l'ensemble des coûts (ventilation, constructions, équipements d'exploitation et de sécurité).

VII Fuites

VII.1 Valeurs de référence

La prise en compte de fuites entre le lieu d'extraction et l'emplacement des ventilateurs d'extraction a pour but d'éviter un sous dimensionnement de ces derniers. 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 :

$$q_{fuites,construction} = \frac{3}{10'000} \cdot \sqrt{\Delta p} \qquad \left[\frac{(m^3 \cdot s^{-1})}{m}\right] \qquad \textit{Éq. VII.1}$$

Fuites des clapets fermés en fonction de la surface intérieure délimitée par le périmètre des châssis :

$$q_{fuites,clapets} = \frac{3}{1'000} \cdot \sqrt{\Delta p} \qquad \left[\frac{(m^3 \cdot s^{-1})}{m}\right] \qquad \textit{Éq. VII.2}$$

Les valeurs de référence tiennent compte d'un certain vieillissement de l'installation. Les clapets de ventilation neufs d'usine doivent afficher des valeurs de fuite sensiblement plus faibles.

VII.2 Nomogramme pour l'estimation des pertes de pression

Les indications du graphique sont valables pour :

- des canaux homogènes sur toute leur longueur ;
- des distances entre clapets de 100 m ;
- des surfaces de clapets de 4,4 m^2 ;
- une pression p_0 à l'extrémité du canal de 400 Pa.

P1 désigne la pression dans le canal côté ventilateur. La pression dans l'espace de circulation est admise constante. Par analogie, le graphique peut être utilisé pour une extraction aux 2 extrémités.

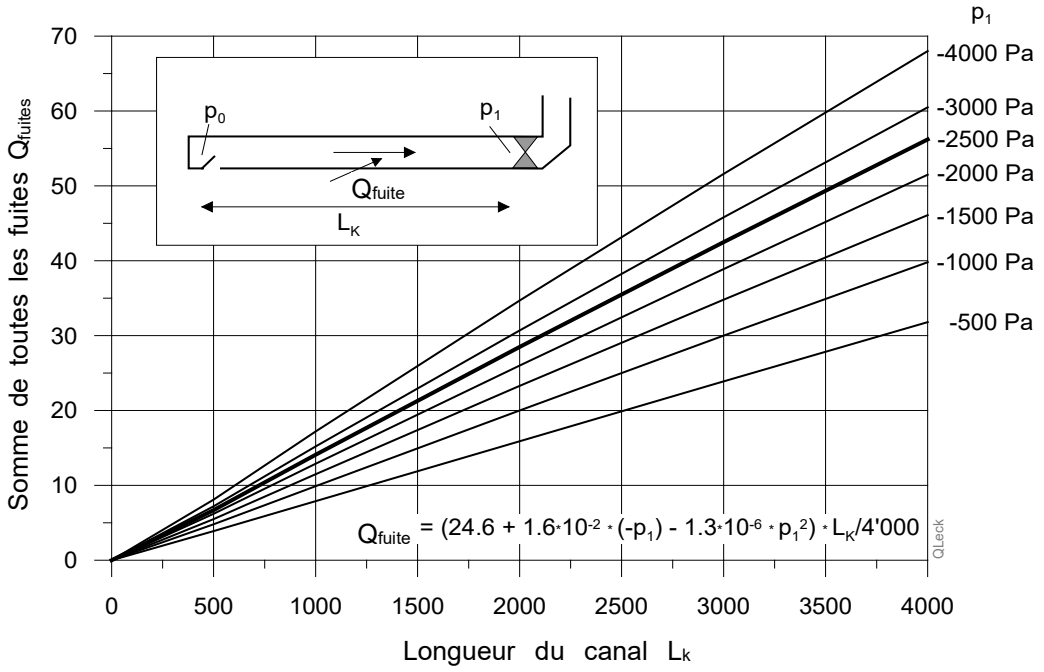

Fig. VII.1 Nomographe pour estimer les pertes de pression du canal d'extraction.

Glossaire

Terme	Signification
abrasion *Abrieb*	Abrasion des pneus, du revêtement de la chaussée, des freins et des embrayages.
Air extérieur *Aussenluft*	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.
Extraction de l'air vicié, air extrait, air vicié *Abluft*	Air chargé des émissions produites dans le tunnel.
Air frais *Frischluft*	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') *Frischluftbedarf*	Débit volumique d'air frais nécessaire pour le maintien de la qualité de l'air dans le tunnel.
Apport d'air frais, air entrant *Zuluft*	Air extérieur forcé de manière contrôlée à l'intérieur du tunnel.
Autosauvetage (phase d') *Selbstrettungsphase*	Durée entre le déclenchement du sinistre et l'arrivée des équipes de secours.
Clapet de ventilation *Abluftklape*	Clapet télécommandé servant à extraire de l'espace de circulation l'air vicié et les fumées dégagées par un incendie.
Détection (temps de) *Detektionszeit*	Temps entre le déclenchement du sinistre et le moment où l'alarme est donnée.
Distance de fuite *Fluchtwegdistanz*	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 liaisons transversales.
Espace de circulation *Fahrraum*	Espace du tunnel limité par la chaussée, le plafond et les parois.
Essais EUREKA *EUREKA-Versuche*	Série d'essais visant à déterminer le comportement des véhicules en feu [20].
Liaison transversale *Querverbindung*	Liaison entre deux tubes de tunnels ou entre un tube et une galerie de sécurité.
Incendie (durée d') *Branddauer*	Intervalle entre le déclenchement et la fin de l'incendie.
Incendie (durée de développement de l') *Brandentwicklungszeit*	Intervalle entre le déclenchement et l'intensité maximale de l'incendie.
Incendie (puissance nominale d') *Brandleistung nominal*	Désignation de l'incendie de dimensionnement.
Incident *Ereignisfall*	Perturbation dans le flux de trafic, accompagnée d'une mise en danger des usagers de la route.
Matière opacifiante *Sichttrübe*	Somme de toutes les matières provoquant une réduction de la visibilité.
Opacité Sichttrübung	Altération de la visibilité par de fines particules ou par de la fumée.
Poids lourd (PL) *Lastwagen*	Désignation du type moyen de véhicule de la catégorie des poids lourds marchandises, pour le calcul des émissions.
Recirculation *Rezirkulation*	Remise en circulation de l'air pollué dans le tube adjacent du tunnel.
Resuspension *Aufwirbelung*	Part de la charge particulaire de l'air produite par des tourbillons soulevant les dépôts de particules.
Section du tunnel *Tunnelquerschnitt*	Section aérodynamique totale de l'espace de circulation.
Trafic horaire déterminant (THD) *Massgeblicher, stündlicher Verkehr (MSV)*	Trafic horaire dans une section, dépassé pendant 30 heures dans l'année.
Trafic journalier moyen (TJM) *Durchschnittlicher, täglicher Verkehr (DTV)*	Nombre de véhicules à moteur empruntant un tronçon routier pendant une année, divisé par 365 jours.

Terme	Signification
Tronçon de tunnel *Tunnelabschnitt*	Tronçon longitudinal de tunnel à dimension géométrique constante.
Ventilation longitudinale *Längslüf*tung	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 *Natürliche Lüftung*	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 *Halbquerlüftung*	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 (chap. 3.4.3).
ventilation semi-transversale/-transversale *Halbquer-/Querlüftung*	Ce système n'est plus autorisé (chap. 3.4.3).
ventilation transversale *Querlüftung*	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 (chap. 3.4.3).
vitesse de fuite *Fluchtgeschwindigkeit*	Vitesse de progression d'une personne fuyant à pied ; valeur typique : 5 km/h ≈ 1.5 m/s.
vitesse de l'air *Luftgeschwindigkeit*	Vitesse de l'écoulement d'air longitudinal dans la section du tunnel.
Voiture de tourisme (VT) *Personenwagen*	Désignation du type moyen de véhicule de la catégorie des voitures de tourisme et de livraison, pour le calcul des émissions.

Bibliographie

Ordonnances

[1] Confédération suisse (1986), « **Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB)** », *RS 814.41*, www.admin.ch.

[2] Confédération suisse (1985), « **Ordonnance sur la protection de l'air (Opair)** », *RS 814.318.142.1*, www.admin.ch.

Instructions, directives et manuels techniques de l'OFROU

[3] Office fédéral des routes OFROU (2005), «**Élaboration des projets et construction des ouvrages d'art des routes nationales**», *directive ASTRA 12001, www.astra.admin.ch*.

[4] Office fédéral des routes OFROU (2008), « **Ventilation des galeries de sécurité des tunnels routiers** », *directive ASTRA 13002, www.astra.admin.ch*.

[5] Office fédéral des routes OFROU (2007), « **Détection des incendies dans les tunnels routiers** », *directive ASTRA 13004, www.astra.admin.ch*.

[6] Office fédéral des routes OFROU (2012), « **Installations vidéo** », *directive ASTRA 13005, www.astra.admin.ch*.

[7] Office fédéral des routes OFROU (2011), « **Signalisation des dispositifs de sécurité dans les tunnels routiers** », *directive ASTRA 13010, www.astra.admin.ch*.

[8] Office fédéral des routes OFROU, Manuel technique EES, 23 001

[9] Office fédéral des routes OFROU, Manuel technique T/G, 24 001

Normes

[10] Société suisse des ingénieurs et architectes SIA (2004), « **Projets de tunnels – Bases générales** », *Norme SIA 197*.

[11] Société suisse des ingénieurs et architectes SIA (2004), « **Projets des tunnels – Tunnels routiers** », *Norme SIA 197/2*.

[12] Union des professionnels suisses de la route VSS (1998), « **Trafic déterminant** », *SN 640016a*.

[13] SUVA tableau des valeurs limites 2022, www.suva.ch/grenzwerte

Documentation / rapports

[14] Association mondiale de la route AIPCR (1996), « **Tunnels routiers : Émissions, ventilation, environnement** », *ISBN 2-84060-034-X, réf. AIPCR 05.02.B, www.piarc.org*.

[15] Association mondiale de la route AIPCR (2004), « **Tunnels routiers : Émissions des véhicules et besoin en air pour la ventilation** », *ISBN 2-84060-177-X, réf. AIPCR 05.14.B.*

[16] Association mondiale de la route AIPCR (2019), «**Tunnels routiers : Émissions des véhicules et besoin en air pour la ventilation**», *ISBN 978-2-84060-500-3*

[17] Association mondiale de la route AIPCR (1999), «**Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers**», *ISBN 2-84060-064-1, réf. AIPCR 05.05.B.*

[18] Office fédéral de l'environnement (2022), « **Manuel informatisé des coefficients d'émission du trafic routier MICET** », *Version 4.2*.

[19] Federal Highway Administration (November 1995), "**Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program**".

[20] Studiengesellschaft Stahlanwendung (Juli 1998), „**Brände in Verkehrstunneln**", *Projekt 145.2 (EUREKA-Versuche)*, Düsseldorf.

Liste des modifications

Édition	Version	Date	Modifications
2021	3.01	30.06.2022	Publication de la version française. Fig. III.1 : correction année 2060. Fig. III.8 : complétée avec 130 km/h. Eq. III.3 et 4 : corrigée. Fig. III.19 et 23 : complétées avec la valeur pour 12 t. Fig. III.1, Fig. III.15, Chap. III.4 : modifications selon HBEFA V4.2 (y.c. Bibliographie).
2021	3.00	06.12.2021	Version française non-publiée. Chap. 7.1.1 : indication sur les prévisions des embouteillages. Chap. 7.1.1 : 1 LW fixe attribué à 2 PWE. Chap. 7.1.2 : énoncé sur les NO_x supprimé. Valeur de dimensionnement pour le CO. Chap. 7.1.5 : ajout d'une exigence minimale de 5 Pa par km de distance entre portails. Chap. 7.4.1 : référence à HBEFA insérée. Chap. 8 : ajout de manuels techniques. Annexe III : extension des données pour le calcul des émissions jusqu'en 2060. Bibliographie.
2008	2.01	01.06.2008	Entrée en vigueur de l'édition 2008. Incorporation du contenu de l'annexe VII dans le corps de la directive. Textes complémentaires de précision. Harmonisations avec SIA 197/2 (chemins de fuite). Exigences en cas de panne et d'interruptions d'exploitation (chap. 7.3).
2008	2.01	01.06.2008	Entrée en vigueur de l'édition 2008. Incorporation du contenu de l'annexe VII dans le corps de la directive. Textes complémentaires de précision. Harmonisations avec SIA 197/2 (chemins de fuite). Exigences en cas de panne et d'interruptions d'exploitation (chap. 7.3).
2004	1.2	31.07.2006	Entrée en vigueur de l'édition 2004. Annexe VII: précisions. Quantité d'air extrait, volume des fuites, dépression dans le canal, courant ascendant naturel.
2004	1.1	21.12.2004	Projet.