

## 12.3 Dimensionnement des installations de ventilation longitudinale

### 12.3.1 Introduction

Les références 2 et 15 donnent la formule de base du dimensionnement des systèmes avec accélérateurs. Nous la redonnons ici pour illustrer les influences dont il sera question dans cette Annexe. La référence 2 donne des informations qualitatives sur les influences météorologiques et l'impact d'un incendie sur le courant d'air le long d'un tunnel. Les informations quantitatives sont disponibles à présent. La référence 2 donne également des recommandations sur la disposition des ventilateurs le long du tunnel. Des informations supplémentaires sur l'optimisation de la disposition des ventilateurs sont maintenant disponibles.

### 12.3.2 Equations

#### **Equation d'équilibre pour les différences de pression**

On trouvera dans la référence 15 une équation pour l'équilibre des différences de pression :

$$n_j \cdot \Delta p_j = \Delta p_{veh} + \Delta p_{tu} + \Delta p_{MT}$$

avec :

$n_j$	=	nombre d'accélérateurs
$\Delta p_j$	=	augmentation de charge par un seul accélérateur
$\Delta p_{veh}$	=	perte de charge due au trafic stationnaire dans le tunnel
$\Delta p_{tu}$	=	perte de charge due aux pertes d'entrée et de sortie et à la friction sur les parois
$\Delta p_{MT}$	=	perte (ou augmentation) de charge en raison des influences météorologiques

Pour  $\Delta p_{MT}$  la référence 15 ne donne aucun chiffre. Il faut inclure dans  $\Delta p_{MT}$  les effets du vent et les différences de pression barométriques, plus particulièrement en zone montagneuse.

On sait maintenant qu'en plus de ces différences de pression, il existe des pressions thermostatiques (effet de cheminée) et l'on sait aussi que l'incendie lui-même provoque une perte de charge. On doit donc les ajouter à l'équation de la façon suivante :

$$n_j \cdot \Delta p_j = \Delta p_{veh} + \Delta p_{tu} + \Delta p_{MT} + \Delta p_{fire} + \Delta p_{th}$$

avec :

$\Delta p_{fire}$	=	perte de charge due à l'incendie
$\Delta p_{th}$	=	perte (ou augmentation) de charge en raison des effets thermostatiques

## 12.3 Jet Fan Calculation Procedure

### 12.3.1 Introduction

In references 2 and 15 basic formulae are presented for designing jet fan systems. They are repeated here to illustrate the type of influences discussed in this appendix. In reference 2 qualitative information is given about meteorological influences and the effect of fire on the airflow through the tunnel. Quantitative information is currently not available. In reference 2 recommendations are given for fan distribution along the tunnel. Additional information on optimising fan distribution is currently not available.

### 12.3.2 Equations

#### **Balance Equation for Pressure Differences**

In reference 15 an equation for the balance of pressure differences is given:

$$n_j \cdot \Delta p_j = \Delta p_{veh} + \Delta p_{tu} + \Delta p_{MT}$$

with:

- $n_j$  = number of jet fans
- $\Delta p_j$  = pressure rise by one jet fan
- $\Delta p_{veh}$  = pressure drop caused by stationary traffic in the tunnel
- $\Delta p_{tu}$  = pressure drop from entrance and exit losses and wall friction
  
- $\Delta p_{MT}$  = pressure drop (or rise) because of meteorological influences

For  $\Delta p_{MT}$  no figures are given in reference 15. In  $\Delta p_{MT}$  wind effects and barometric pressure differences should be included, especially in mountainous areas.

It is now recognized that in addition to these pressure differences, there are thermostatic pressures (chimney effect) and the fire itself causes a pressure drop. These should be added into the equation as follows:

$$n_j \cdot \Delta p_j = \Delta p_{veh} + \Delta p_{tu} + \Delta p_{MT} + \Delta p_{fire} + \Delta p_{th}$$

with:

- $\Delta p_{fire}$  = pressure drop caused by the fire
- $\Delta p_{th}$  = pressure drop (or rise) caused by thermostatic effects

### **Equation de poussée des accélérateurs**

La référence 15 donne la poussée des accélérateurs comme suit :

$$F_j = \Delta p_j \cdot A_T = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \rho \cdot Q_j \cdot (u_j - u^*)$$

avec :

- $F_j$  = poussée par un seul accélérateur
- $\Delta p_j$  = augmentation de charge par un seul accélérateur
- $\eta_1$  = performance ou efficacité des accélérateurs
- $\eta_2$  = friction des parois (efficacité de l'installation)
- $\eta_3$  = influence entre accélérateurs (efficacité de l'ensemble du système)
- $\rho$  = densité du milieu s'écoulant au travers de l'accélérateur (air ou fumée)
- $Q_j$  = courant d'air au travers de l'accélérateur
- $u_j$  = vitesse à la sortie du ventilateur
- $u^*$  = vitesse de l'air du tunnel (ou vitesse de la fumée)
- $A_T$  = section transversale du tunnel

### **Prise en considération des influences**

Les influences dépendant du lieu où se produit l'incendie dans le tunnel, les calculs doivent être faits pour plusieurs positions du foyer :

- si le foyer se situe près de l'entrée du tunnel, les véhicules n'ont pas d'influence significative ;
- si le foyer se situe près de la sortie du tunnel, on ne doit prendre en compte pratiquement aucune influence en aval du foyer ;
- les effets de cheminée peuvent être positifs sur les rampes ascendantes et négatifs sur les rampes descendantes ;
- dans les tunnels courts, les effets du vent et les influences météorologiques sont importants, alors que dans les tunnels de grande longueur, c'est la friction sur les parois qui joue un rôle plus important.

### **Influence de l'incendie sur le système d'accélérateurs**

Un incendie donne lieu à des fumées à haute température. Cela a une influence aussi bien sur l'efficacité des accélérateurs que sur les pertes de charge en tunnel, plus particulièrement :

- la poussée d'un accélérateur décroît au fur et à mesure que la température de l'air augmente – les accélérateurs peuvent même s'arrêter à cause des températures élevées ;
- les fumées chaudes sortant du tunnel ont une vitesse supérieure à celle de l'air frais entrant dans ce tunnel, et les pertes de charge associées sont plus importantes.

Si le tunnel présente une déclivité, il se produit un effet de cheminée : une inclinaison positive vers l'aval du foyer favorise le système d'accélérateurs, et une inclinaison négative travaille contre ces accélérateurs.

Pour dimensionner un système d'accélérateurs, il est nécessaire d'évaluer l'évolution de la température en aval du foyer.

### **Jet Fan Thrust Equation**

In reference 15 the jet fan thrust is given as:

$$F_j = \Delta p_j \cdot A_T = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \rho \cdot Q_j \cdot (u_j - u^*)$$

with:

$F_j$	= jet fan thrust of one jet fan
$\Delta p_j$	= pressure rise by one jet fan
$\eta_1$	= jet fan performance or efficiency
$\eta_2$	= wall friction (installation efficiency)
$\eta_3$	= influence between jet fans (efficiency of the total system)
$\rho$	= density of the medium streaming through the jet fan (air or smoke)
$Q_j$	= airflow through the jet fan
$u_j$	= fan outflow velocity
$u$	= tunnel air velocity (or smoke velocity)
$A_T$	= cross section of the tunnel

### **Consideration of Influences**

Because the influences depend on the fire site within the tunnel, calculations should be made for several fire positions:

- if the fire is near the entrance of the tunnel, the vehicles will have no significant influence;
- if the fire is near the tunnel exit, almost no influences downstream of the fire have to be taken into account;
- chimney effects can be positive on rising gradients and negative on falling gradients;
- in shorter tunnels the effects of wind and meteorological influences are important, whereas in longer tunnels the wall friction plays a more important role.

### **The Influence of Fire on a Jet Fan System**

A fire causes smoke with high temperatures. This influences both the efficiency of the jet fans and the pressure losses in the tunnel, specifically:

- the thrust of a jet fan decreases as the air temperature increases – jet fans may even fail because of high temperatures;
- hot smoke leaving the tunnel will have a higher velocity than the fresh air entering the tunnel, and the associated pressure losses will be higher.

If a tunnel has a slope, then chimney effects will occur: a positive inclination downstream of the fire is in favour of the jet fan system, and a negative inclination works against the jet fans.

In order to design a jet fan system, it is necessary to estimate the evolution of the temperature downstream the fire.

### Température en aval du foyer

Pour déterminer les températures en aval, il faut connaître : la localisation et la puissance thermique de l'incendie, la température et la vitesse du courant d'air en amont.

La température de l'air en aval du foyer dépend des échanges thermiques entre l'incendie, les parois du tunnel et l'air. Comme ces échanges ne sont pas encore totalement connus, en particulier à proximité immédiate du foyer, on a généralement recours à une analyse tri-dimensionnelle (3D) plus précise. Mais on peut aussi effectuer une analyse uni-dimensionnelle, telle qu'elle est proposée ci-dessous :

La puissance thermique de l'incendie est dispersée par :

- le rayonnement direct sur les parois du tunnel près de l'incendie,
- le transfert thermique direct au courant d'air dans le tunnel.

On peut estimer que le transfert thermique aux parois près du foyer, par rayonnement direct, correspond globalement à un tiers de la puissance thermique totale  $Q$ , la partie restante s'évacuant dans la fumée.

La température moyenne de l'air/fumée dans la section transversale immédiatement en aval du foyer est déterminée selon l'équation suivante :

$$T = \frac{\frac{2}{3} \cdot Q}{\rho_0 \cdot c_p \cdot A_T \cdot u_0^*} + T_0$$

avec  $\rho_0$ ,  $T_0$  et  $u_0^*$  basés sur les conditions en amont du foyer. En aval du foyer, la chaleur transportée par le courant air/fumée est transmise aux parois du tunnel, à la fois par convection et par rayonnement de la fumée.

- Flux thermique convectif  $\Phi_{conv}$

Le flux thermique échangé par convection entre l'air/fumée et les parois du tunnel sur une section de longueur  $\ell$  s'exprime comme suit :

$$\Phi_{conv} = \frac{q_{conv}}{P \cdot \ell} = hc \cdot (T - T_{wall})$$

avec :

$q_{conv}$  = flux thermique spécifique de convection

$P$  = périmètre de la section transversale du tunnel

$\ell$  = longueur de la section considérée

### Temperature Downstream of the Fire

The downstream temperatures can be determined if the following is known: the location and heat release rate of the fire, the upstream airflow temperature and velocity.

The air temperature downstream of the fire depends on the thermal exchanges between the fire, the tunnel walls and the air. Since these exchanges are still not completely understood, especially those closest to the fire, a more accurate, three-dimensional (3D) analysis is usually required. However, it is possible to conduct a one-dimensional argument, which is proposed below.

The thermal release rate of the fire is dispersed by:

- direct radiation on the tunnel walls near the fire, and
- direct thermal transfer to the airflow in the tunnel.

It can be estimated that the heat transfer to the walls near the fire by direct radiation globally corresponds to one-third of the total fire heat release rate  $Q$ , with the remainder going into the smoke.

The average temperature of air/smoke in the cross section immediately downstream of the fire is determined by the following equation:

$$T = \frac{\frac{2}{3} \cdot Q}{\rho_0 \cdot c_p \cdot A_T \cdot u_0^*} + T_0$$

with  $\rho_0$ ,  $T_0$  and  $u_0^*$  based on the conditions upstream of the fire. Downstream of the fire, the heat transported by the air/smoke flow is transferred to the tunnel walls both by convection and by smoke radiation.

- Convective Heat Flux  $\Phi_{conv}$

The heat flux exchanged by convection between air/smoke and the tunnel walls on a section of length  $\ell$  is expressed as follows:

$$\Phi_{conv} = \frac{q_{conv}}{P \cdot \ell} = hc \cdot (T - T_{wall})$$

where:

$q_{conv}$  = specific convective heat flux

$P$  = perimeter of the tunnel cross section

$\ell$  = length of considered section

Parmi la documentation disponible pour exprimer le coefficient d'échange par convection  $hc$ , nous retiendrons la proposition suivante de Petukhov [19]

$$hc = \frac{\frac{\lambda}{8} \cdot c_p \cdot \rho \cdot u^*}{1.07 + 12.7 (\text{Pr}^{2/3} - 1) \sqrt{\frac{\lambda}{8}}}$$

qui présente l'avantage de prendre en compte non seulement les propriétés thermo-physiques de l'air s'écoulant dans le tunnel et sa vitesse, mais aussi les conditions de rugosité des parois via le coefficient de perte de charge  $\lambda$ .

En première approximation, on peut négliger la variation du coefficient  $c_p$  et du nombre de Prandtl  $\text{Pr}$  selon la température de l'air.

- Flux thermique radiatif

En ce qui concerne le transfert de chaleur par rayonnement aux parois, en assimilant la fumée à un corps noir et en considérant que la fumée remplit totalement la section du tunnel, le flux de chaleur transmis est donné par l'expression suivante :

$$\Phi_{rad} = \frac{q_{rad}}{P \ell} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot F \cdot (T^4 - T_{wall}^4)$$

avec :

$\varepsilon$  = émissivité de la paroi

$\sigma_0$  = constante de Stefan Boltzmann ( $5.68 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )

$P$  = périmètre de la section transversale du tunnel

$\ell$  = longueur de la section considérée

$F$  = coefficient de forme entre la fumée et les parois, supposé être  $F=1$

La température en aval de l'incendie dépend de l'émissivité des parois  $\varepsilon$ . Cette émissivité dépend de la nature du revêtement du tunnel, qui peut être composé de plusieurs matériaux différents. Comme point de départ de  $\varepsilon$  on peut choisir  $\varepsilon = 0.7$ .

L'équation pour  $q_{rad}$  peut alors être ré-écrite comme suit :

$$q_{rad} = hr \cdot P \cdot \ell \cdot (T - T_0)$$

avec :

$$hr = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T + T_0)(T^2 + T_0^2)$$

Ce dernier coefficient dépend des températures de l'air chaud et des parois. Le calcul de la température requiert donc une solution itérative des équations de l'équilibre thermique.

Among the literature available for expressing the convective exchange factor  $hc$ , we will retain the following proposition of Petukhov [19].

$$hc = \frac{\frac{\lambda}{8} \cdot c_p \cdot \rho \cdot u^*}{1.07 + 12.7 (\text{Pr}^{2/3} - 1) \sqrt{\frac{\lambda}{8}}}$$

which shows the advantage of considering not only the thermo-physical properties of the air flowing inside the tunnel and its velocity, but also the roughness condition of the walls via the wall friction factor  $\lambda$ .

As a first approximation, the variations of the factor  $c_p$  and the Prandtl number  $\text{Pr}$  with the air temperature can be neglected.

- Radiative Heat Flux

Concerning the radiating transfer of heat to the walls, by assimilating smoke to a black body and considering that smoke fills up the whole tunnel section, the heat flux transmitted is given by the following expression:

$$\Phi_{rad} = \frac{q_{rad}}{P \ell} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot F \cdot (T^4 - T_{wall}^4)$$

with:

- $\varepsilon$  = wall emissivity
- $\sigma_0$  = Stefan Boltzmann constant ( $5.68 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )
- $P$  = perimeter of the tunnel cross section
- $\ell$  = length of considered section
- $F$  = shape factor between smoke and walls, assumed to be  $F=1$

The temperature downstream of the fire depends on the wall emissivity  $\varepsilon$ . This wall emissivity depends on the kind of tunnel lining, which can be composed of several different materials. As a starting point  $\varepsilon$  can be chosen as  $\varepsilon = 0.7$ .

The equation for  $q_{rad}$  can be rewritten as:

$$q_{rad} = hr \cdot P \cdot \ell \cdot (T - T_0)$$

with:

$$hr = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T + T_0)(T^2 + T_0^2)$$

This latter factor depends on the temperatures of the hot air and the wall. Calculating the temperature, therefore, requires an iterative solution of the equations of the heat balance.



En prenant en compte la variation du flux thermique le long d'un élément de tunnel de longueur  $\Delta l$ , la diminution correspondante de température en aval du foyer est la suivante :

$$\delta T / \delta x = - \frac{P \cdot (hc + hr) (T - T_{wall})}{\rho_0 \cdot c_p \cdot A_T \cdot u_0^*}$$

avec  $x$  tout au long du tunnel et  $x = 0$  sur le site du foyer.

On peut considérer, dans une première étape, que  $T_{wall} \approx T_0$ . Cependant, après le départ du feu, les parois du tunnel se réchauffent progressivement et le transfert thermique par convection et rayonnement diminue. Ce phénomène est rapide dans le cas d'un incendie important.

### Effet de la température sur les pertes de charge

L'effet de la température de l'air sur les pertes de charge en tunnel est exprimé par un accroissement linéaire de ces pertes avec la vitesse du courant d'air (en négligeant la viscosité cinématique de l'air). La pression dynamique de l'air est égale à :

$$\frac{1}{2} \rho u^2 = \frac{1}{2} \frac{\dot{M}}{A_T} \cdot u \quad \text{avec} \quad \dot{M} = \rho \cdot u \cdot A_T$$

Le débit massique  $M$  est considéré comme constant dans le cas d'un calcul permanent.

- Perte de charge due à un trafic stationnaire dans le tunnel ( $\Delta p_{veh}$ )

On suppose normalement que seul le trafic en amont de l'incendie est arrêté si bien que la perte de charge  $\Delta p_{veh}$  n'est pas influencée par la température. L'influence de la température sur  $\Delta p_{veh}$  n'est calculée que si on suppose la présence de trafic en aval du foyer.

- Perte de charge due aux paramètres physiques du tunnel ( $\Delta p_{tu}$ )

La perte de charge  $\Delta p_{tu}$  peut s'écrire  $\Delta p_{tu} = \Delta p_{entrance} + \Delta p_{walls} + \Delta p_{exit}$

A l'entrée, l'air frais pénètre dans le tunnel et s'écoule en direction de l'incendie. Ce n'est que dans la dernière partie, en aval du foyer, que le frottement des parois et les pertes de charge de sortie augmentent.

Conformément à la référence 15 et en prenant en compte l'influence de l'augmentation de la température sur la densité et la vitesse, les pertes de charge par frottement pariétal d'une section de longueur élémentaire  $\ell$  en aval du foyer peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta p_{wall, downstream} = \lambda \cdot \frac{\ell}{D_H} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot u_0^2 \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)$$

Taking into account the heat flux variation along a tunnel element of length  $\Delta l$ , the corresponding temperature decrease downstream of the fire is as follows:

$$\delta T / \delta x = - \frac{P \cdot (hc + hr) (T - T_{wall})}{\rho_0 \cdot c_p \cdot A_T \cdot u_0^*}$$

with  $x$  being along the length of the tunnel and  $x = 0$  at the fire site.

It can be considered, as a first step, that  $T_{wall} \approx T_0$ . However, after the fire starts, the tunnel walls will heat progressively and the thermal transfer by convection and radiation will be reduced. This will happen quickly in the case of a large fire.

### Effect of Temperature on Pressure Drops

The effect of air temperature on the tunnel pressure losses is expressed by a linear increase of these losses with the airflow velocity (neglecting the kinematic viscosity of air). The air dynamic pressure equals:

$$\frac{1}{2} \rho u^2 = \frac{1}{2} \frac{\dot{M}}{A_T} \cdot u \quad \text{with} \quad \dot{M} = \rho \cdot u \cdot A_T$$

The mass flow rate  $M$  is considered as constant in case of a steady-state calculation.

- Pressure drop caused by stationary traffic in the tunnel ( $\Delta p_{veh}$ )

Normally it is assumed that only traffic upstream of a fire is blocked, and there is no temperature influence on the pressure drop  $\Delta p_{veh}$ . Only if traffic is assumed to be present downstream of the fire should this influence be calculated.

- Pressure drop due to physical tunnel parameters ( $\Delta p_{tu}$ )

The pressure drop  $\Delta p_{tu}$  can be written as  $\Delta p_{tu} = \Delta p_{entrance} + \Delta p_{walls} + \Delta p_{exit}$

At the entrance, fresh air enters the tunnel and flows toward the fire. Only in the latter part, downstream of the fire, will the wall friction and the exit pressure loss be increased.

In accordance with reference 15 and taking in account the influence of the temperature rise on density and velocity, the pressure loss of wall friction of an elementary section of length  $\ell$  downstream of the fire can be written as:

$$\Delta p_{wall, downstream} = \lambda \cdot \frac{\ell}{D_H} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot u_0^2 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)$$

La température T est supposée être constante tout au long de la longueur  $\ell$ .

Conformément à la référence 2, la perte de charge à la sortie du tunnel peut s'écrire comme suit :

$$\Delta p_{exit} = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot u_0^2 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)$$

- Perte de charge due à l'incendie ( $\Delta p_{fire}$ )

En raison de la puissance thermique de l'incendie, qui provoque de la turbulence et une accélération du courant air/fumée, l'incendie est à l'origine d'une perte de charge.

Le meilleur moyen de déterminer cette perte de charge est d'utiliser un modèle numérique. Les calculs ont indiqué que la perte de charge  $\Delta p_{fire}$  peut varier de 10 Pa - 20 Pa pour un incendie de 30 MW à 40 Pa - 100 Pa pour un incendie de 200 MW. Mais on constate une influence de la vitesse du courant d'air dans le tunnel et de la section transversale.

- Perte ou augmentation de charge du fait des effets de cheminée ( $\Delta p_{th}$ )

L'effet de cheminée pour un élément de tunnel de longueur  $\ell$  peut s'écrire comme suit :

$$\Delta P_{th, chimney} = - (\rho_0 - \rho) \cdot g \cdot d \cdot \ell$$

avec d le gradient de la rampe (+ si ascendant, – si descendant)

#### Effets de la température sur les accélérateurs

Si l'on connaît les conditions de fonctionnement de chaque ventilateur, on peut déterminer la puissance totale de propulsion exercée sur l'air du tunnel.

Un incendie peut affecter les accélérateurs de deux façons :

- (1) Plus la température des fumées est élevée, plus leur densité des fumées est faible, avec pour conséquence une faible poussée de l'accélérateur.
- (2) Les accélérateurs en aval du foyer peuvent tomber en panne en raison des fumées chaudes.

- Influence de la température des fumées

Du fait de l'augmentation de la température, la densité du mélange air-fumées diminue et, dans le même temps, la vitesse de ce mélange  $u^*$  augmente. Ces deux effets ralentissent la poussée de l'accélérateur, comme le montre la formule de poussée.

The temperature T is assumed to be constant along the length  $\ell$  .

In accordance with reference 2, the pressure drop at the tunnel exit can be written as:

$$\Delta p_{exit} = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot u_0^2 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)$$

- Pressure drop caused by the fire ( $\Delta p_{fire}$ )

Due to the thermal release rate of the fire, causing turbulence and an acceleration of the air/smoke flow, the fire causes a pressure drop.

The best way to determine this pressure loss is to use a numerical model. Calculations have indicated that the pressure loss  $\Delta p_{fire}$  can range from 10 Pa - 20 Pa for a 30 MW fire to 40 Pa - 100 Pa for a 200 MW fire. However, there will be an influence of tunnel airflow velocity and cross section.

- Pressure drop or rise caused by chimney effects ( $\Delta p_{th}$ )

The chimney effect for a tunnel element of length  $\ell$  can be written as:

$$\Delta P_{th, chimney} = - (\rho_0 - \rho) \cdot g \cdot d \cdot \ell$$

where d is the gradient of the slope (+ if upgrade, – if downgrade)

#### Effects of Temperature on Jet Fans

Knowing the operating conditions of each jet fan group in the tunnel allows the determination of the total propelling power exerted to the tunnel air.

The jet fans are affected by a fire in two ways:

- (1) The high temperatures of the smoke the density of the smoke is low, causing a low jet fan thrust
- (2) Because of the hot smoke jet fans downstream the fire may fail.

- Influence of Smoke Temperature

Due to a temperature rise the density of the air-smoke mixture will decrease and, at the same time, the velocity of the air-smoke mixture  $u^*$  in the tunnel will increase. Both effects will lower the jet fan thrust as can be seen in the formula for jet fan thrust.

Un exemple :

Si la poussée de l'accélérateur est de 500 N et la vitesse de sortie de 35 m/s dans des conditions de 20°C, ce qui donne une vitesse de l'air dans le tunnel de 5 m/s, le même accélérateur dans un tunnel à 400°C fournira une poussée qui peut être calculée comme suit :

La densité sera  $\rho = (273+20)/(273+400) \cdot 1.2 \text{ kg/m}^3 = 0,74 \text{ kg/m}^3$ .

En raison de la densité plus faible,  $u^*$  sera  $1/0,74 \cdot 5 \text{ m/s} = 6,75 \text{ m/s}$

La vitesse de sortie de l'accélérateur  $u_j$  est encore d'environ 35 m/s lorsque l'appareil est pourvu d'un moteur à cage d'écureuil

La poussée  $F_j$  est alors 58 % de la poussée d'origine.

Il est évident que l'augmentation de la température en aval du foyer doit être calculée en fonction du positionnement des accélérateurs dans le tunnel. Un élément qui peut porter à confusion est que les fumées chaudes se refroidissent sur les parois et le plafond du tunnel. Il en résulte que la densité augmente et donc que la poussée de l'accélérateur augmente.

Cela signifie que la poussée effective de l'accélérateur dépend de l'emplacement de l'appareil, de l'emplacement du foyer à l'intérieur du tunnel et des effets de refroidissement des parois sur les fumées. Ceci implique que l'on doit calculer le travail de l'ensemble du système d'accélérateurs pour plusieurs positions du foyer d'incendie à l'intérieur du tunnel pour être sûr que ce système est fiable.

- Panne de ventilateurs dues aux fumées chaudes ou à l'incendie

Les accélérateurs sont construits pour résister à des températures élevées. Mais les fumées peuvent présenter des températures très supérieures à celles auxquelles les ventilateurs sont censés résister. Les températures auxquelles les accélérateurs doivent résister sont normalement 250°C et 400°C. Ce qui implique que, si un incendie se produit juste au-dessous d'un accélérateur, celui-ci tombe en panne. Pour s'assurer que le réseau d'accélérateurs présente une fiabilité suffisante, les calculs doivent inclure la panne des appareils pour plusieurs positions de l'incendie de dimensionnement à l'intérieur du tunnel.

- Combinaison faible efficacité et panne des accélérateurs

La figure 12.3.1 illustre cette situation. Les accélérateurs 2 et 3 tombent en panne en raison de la température élevée, l'accélérateur 4 ne tombe pas en panne, mais sa poussée est très inférieure à celle de l'accélérateur 1 en raison de la densité plus faible.

An example:

If the jet fan thrust is 500 N and the output velocity is 35 m/s under 20°C conditions, causing a velocity in the tunnel of 5 m/s, the same jet fan installed in a tunnel at 400°C will deliver a thrust which can be calculated as follows:

The density will be  $\rho = (273+20)/(273+400) \cdot 1.2 \text{ kg/m}^3 = 0.74 \text{ kg/m}^3$ .

Because of the lower density  $u^*$  will be  $1/0.74 \cdot 5 \text{ m/s} = 6.75 \text{ m/s}$

The jet fan output velocity  $u_j$  is still about 35 m/s when the motor is a squirrel-cage motor.

The jet fan thrust  $F_j$  will be then 58% of the original thrust.

It is clear that the temperature rise downstream of the fire should be calculated in relation to the position of the jet fans in the tunnel. A confusing element is that the hot smoke will be cooled by the walls and ceiling of the tunnel. As a result the density will increase and therefore the jet fan thrust increases.

This means the real jet fan thrust depends on the location of the jet fan, the location of the fire in the tunnel and the cooling effects of walls on the smoke. This implies that the working of the total jet fan system has to be calculated for several positions of a fire in the tunnel to be assured of designing a reliable jet fan system.

- Failure of Fans Due to Hot Smoke or Fire

Jet fans can be made resistant to high temperatures. However, smoke temperatures can be much higher than the temperatures that jet fans can be made to resist. Normally used resistance temperatures for jet fans are 250°C and 400°C. This implies that if a fire occurs just under a jet fan this jet fan will fail. Also jet fans in the zone with temperatures higher than the resistance temperature will fail. To be sure of a sufficient reliability of the jet fan system the calculations including the failure of jet fans should be made for several positions of the design fire in the tunnel.

- Combination of Low Efficiency and Failure of Jet Fans

Figure 12.3.1 illustrates the situation. Jet Fans 2 and 3 will fail because of high temperatures, Jet Fan 4 will not fail, but has a much lower thrust than Jet Fan 1 because of the lower density.

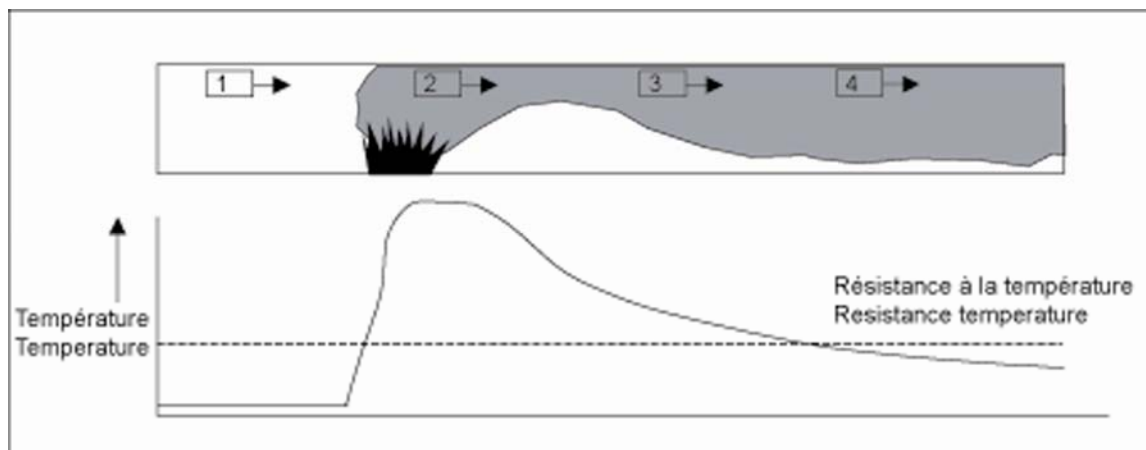


Figure 12.3.1 - Effets de la température sur la fiabilité et l'efficacité des accélérateurs / Effects of temperature on jet fan reliability and efficiency

Il est évident qu'il serait bon de positionner les accélérateurs aussi près que possible de l'entrée du tunnel ou à grande distance les uns des autres, longitudinalement. Le risque d'une panne du fait de l'incendie ou des fumées chaudes est alors aussi faible que possible. Et, dans le même temps, les accélérateurs fonctionnent dans une zone de température basse et de densité normale<sup>2</sup>. Cela n'est malheureusement possible que si le nombre d'accélérateurs à installer est restreint.

La figure 12.3.2 donne quelques exemples d'accélérateurs installés à la tête du tunnel.

- Poussée d'un accélérateur dans les gaz chauds

Conformément à la formule mentionnée précédemment pour la poussée d'un accélérateur, cette poussée au milieu de gaz chauds peut s'écrire de la manière suivante :

$$F_j = \Delta p_j \cdot A_T = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \rho_0 \cdot Q_j \cdot \left( \frac{T_0}{T} \cdot u_j - u_0 \right)$$

<sup>2</sup> Aux Pays-Bas, pratiquement tous les tunnels construits depuis 1970 sont pourvus d'une ventilation longitudinale par accélérateurs. Cela semble tout à fait raisonnable, compte tenu du fait que tous ces tunnels sont unidirectionnels, avec des longueurs comprises entre 600 et 900 m. Depuis 1996, des accélérateurs ont été positionnés à la tête d'entrée ou aussi près que possible de l'entrée du tunnel.



**Figure 12.3.2 - Accélérateurs installés aux têtes / Jet fans located in portals**

It is clear that it would be wise to position the jet fans as closely as possible to the entrance of the tunnel or with a large longitudinal spacing. The chance of failure of jet fans by fire or hot smoke is then as low as possible. And at the same time the jet fans will work well in a region with low temperatures with normal density. The efficiency will be as high as possible.<sup>2</sup> Unfortunately, this position is only available for a small number of all the jet fans to be installed.

Some examples of jet fans located in the tunnel portal are shown in Figure 12.3.2.

- Jet Fan Thrust in Hot Gases

In accordance to the earlier mentioned formula for the jet fan thrust the thrust in hot gases can be written as:

$$F_j = \Delta p_j \cdot A_T = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \rho_0 \cdot Q_j \cdot \left( \frac{T_0}{T} \cdot u_j - u_0 \right)$$

<sup>2</sup> In the Netherlands, almost all tunnels built since 1970 have jet fan-driven longitudinal ventilation systems. This is quite reasonable because all of these tunnels are unidirectional and lengths of 600-900 m. Since 1996, jet fans are positioned in the entrance portal or as near as possible to the tunnel entrance.



On peut supposer que le volume passant dans le ventilateur  $Q_j$  et les rendements  $\eta$  ne sont pas affectés par l'augmentation de température. De la même façon,  $u_j$  n'est pas affecté par la température : la réduction de poussée due à la température résulte de l'influence de la densité et de la vitesse de l'air du tunnel.

### ***Influences météorologiques (vent)***

La différence de pression entre les têtes (différence de pression barométrique et/ou effet du vent extérieur) doit être déterminée pour le pourcentage de temps au-delà duquel il est acceptable d'avoir une vitesse réduite du courant d'air en direction du foyer (95 % du temps par exemple).

#### Influence du vent sur les têtes

L'importance de l'influence du vent dépend largement du niveau auquel la tête du tunnel se trouve : une tête située au-dessus du niveau du sol capte davantage de vent qu'une tête située au-dessous du sol.

D'autres facteurs importants sont les dimensions de la façade de la tête, sa forme, l'inclinaison des parois ou des talus le long de la route et la présence de murs anti-bruit le long de la route, de bâtiments et d'arbres autour des entrées.

La pression du vent est souvent calculée à l'aide de la formule suivante :

$$p_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \cdot \zeta_{\text{wind}} \cdot \rho \cdot u_w^2$$

avec :

$\rho$  = densité de l'air

$u_w$  = vitesse du vent

$\zeta_{\text{wind}}$  = coefficient représentant les conditions telles que décrites ci-dessus.

Dans la situation où la vitesse du vent  $u_w$  et la vitesse de l'air du tunnel  $u_t$  sont du même ordre de grandeur, il existe une influence mutuelle entre le vent et l'air entrant dans le tunnel et s'en écoulant. Pour tenir compte de cette influence mutuelle, la pression du vent s'exprime comme suit :

$$p_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \cdot \zeta_{\text{wind}} \cdot \rho \cdot u_w^2 + \frac{1}{2} \cdot \zeta_{\text{wind\&tunnel}} \cdot \rho \cdot u_w \cdot u_t$$

où :

$\zeta_{\text{wind}}$  et  $\zeta_{\text{wind\&tunnel}}$  dépendent largement de la forme et des dimensions des têtes.

Comme il est difficile de déterminer une valeur pour  $u_w$  au niveau de la tête, prenant en compte toutes les conditions environnantes, il est recommandé de choisir une valeur de 10 m au-dessus du sol. Les vitesses du vent sont mesurées de façon courante à cette hauteur et peuvent être déterminées pour plusieurs directions et fréquences en un point particulier.

It can be assumed that the volume flow through the fan  $Q_j$  and the efficiencies  $\eta$  will not be affected by the temperature rise. Likewise,  $u_j$  is not affected by temperature: the thrust reduction with temperature is due to the influence of the density and the tunnel air velocity.

### ***Meteorological Influences (Wind)***

The pressure difference between the tunnel portals (difference of barometric pressure and/or effect of the outside wind) must be determined for the percentage of time beyond which it is acceptable to have a reduced airflow velocity upward of the fire (95% of the time for example).

#### Wind Influences on Portals

The magnitude of the wind influence depends largely on the level of the portal: a portal above ground level catches more wind than a portal under ground level.

Other important factors are the dimensions of the portal facade, the shape of the facade, slope of the walls or verges along the road and the presence of sound attenuating screens along the road, buildings and trees around the portals.

Wind pressure is very often calculated by the formula:

$$p_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \cdot \xi_{\text{wind}} \cdot \rho \cdot u_w^2$$

with:

$\rho$  = density of the air

$u_w$  = wind speed

$\xi_{\text{wind}}$  = a factor representing the circumstances as mentioned above

In the situation when wind speed  $u_w$  and tunnel air speed  $u_t$  are in the same range there is a mutual influence between the wind and the air flowing in and out the tunnel. To incorporate the mutual influence the wind pressure should be written as:

$$p_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \cdot \xi_{\text{wind}} \cdot \rho \cdot u_w^2 + \frac{1}{2} \cdot \xi_{\text{wind\&tunnel}} \cdot \rho \cdot u_w \cdot u_t$$

with:

$\xi_{\text{wind}}$  and  $\xi_{\text{wind\&tunnel}}$  depending largely on the shape and dimensions of the portals.

Because it is difficult to establish a value for  $u_w$  on portal level taking in account all the surrounding circumstances it is recommended to take a value 10 meters above ground level. Wind speeds are commonly measured at this height and can be established for several directions and frequencies at a particular place.

La valeur de  $\xi_{wind}$  et  $\xi_{wind\&tunnel}$  peut être mesurée sur des modèles. Les graphes de la figure 12.3.3 donnent une approximation des valeurs pour trois types de têtes, sur la base d'un tunnel à deux tubes et deux voies par tube.

Les graphes ne sont valables que pour un flux dans le sens de circulation. Dans ces graphes,  $\gamma$  est l'angle entre la direction du vent et l'orientation de l'entrée par rapport à la tête de sortie.

La valeur de  $\xi_{wind}$  est donnée pour le graphe selon  $u_t/u_w = 0$ , en d'autres termes lorsque  $u_t = 0$  m/s.

La valeur de  $\xi_{wind\&tunnel}$  peut être trouvée en calculant le taux  $u_t/u_w$ . Pour des valeurs de taux comprises entre 0 et 1, les coefficients sont trouvés par interpolation. Pour des taux supérieurs à 1, on peut prendre les valeurs de  $u_t/u_w = 1$  : si le taux est supérieur à 1, l'influence du vent est faible et l'erreur de calcul insignifiante.

Ces graphes sont utilisables en première approximation. Pour des calculs détaillés, il est nécessaire de recourir à des essais spécifiques sur modèles. On recommande d'utiliser les données météorologiques de vent disponibles ; sinon il est recommandé d'effectuer des mesures sur le site.

### ***Pertes de charge dues à un blocage du trafic***

La référence 2 donne une formule pour l'effet de pistonement ou de tirage par voie de circulation, mais qui est valable pour le trafic s'écoulant le long du tunnel. En cas d'incendie, l'hypothèse est que les véhicules s'accumulent derrière le foyer et continuent à entrer dans le tunnel jusqu'à ce que la queue atteigne l'entrée du tube ou jusqu'à l'arrêt donné par l'opérateur.

On considère que les véhicules en aval du foyer quittent le tunnel par la tête de sortie sans difficulté.

Le nombre de véhicules bloqués en amont de l'incendie est donc égal à la somme des véhicules se trouvant déjà dans le tunnel lorsque l'incendie démarre et du nombre de véhicules pénétrant dans le tunnel avant que le trafic soit arrêté ou jusqu'à ce que le tube soit rempli. Quoi qu'il en soit, le nombre total est limité par la capacité d'accumulation de la section de tunnel en amont de l'incendie.

The value of  $\xi_{wind}$  and  $\xi_{wind\&tunnel}$  can be measured in scale models. An approximation of the values is given in the graphs in Figure 12.3.3 for three main types of tunnel portals, based on a double tube tunnel with 2 lanes per tube.

The graphs are only valid for a tunnel flow in the traffic direction. In these graphs  $\gamma$  is the angle between the wind direction and the orientation of the entrance versus exit portal.

The value of  $\xi_{wind}$  can be found for the graph according to  $u_t/u_w = 0$ , in other words when  $u_t = 0$  m/s.

The value of  $\xi_{wind\&tunnel}$  can be found by calculating the ratio  $u_t/u_w$ . For ratio values between 0 and 1 the coefficients can be found by interpolation. For ratios larger than 1 the values for  $u_t/u_w = 1$  can be used: if the ratio is larger than 1 the wind influence is small and the calculation error is insignificant.

These graphs may be used for a first approximation. For detailed calculations specific model tests must be done. It is recommended to use available meteorological wind data; if this is not available it is recommended that site measurements be made.

### ***Pressure Losses Because of Blocked Traffic***

In reference 2, a formula is given for the piston or drag effect per lane. However, this formulae fits for moving traffic along the total tunnel length. In case of fire the hypothesis is that vehicles gather behind the fire and go on entering the tunnel until the queue reaches the tube entrance or until the operator stops the traffic.

It is considered that the vehicles downstream of the fire will proceed to the tunnel exit portal without difficulty.

This means the number of vehicles blocked upstream of the fire equals the sum of the number of vehicles already in the tunnel when the fire starts and the number of vehicles still entering the tunnel before traffic is stopped or until the upstream part of the tube is filled up. Anyway the total number is limited to the accumulation capacity of the tunnel part located upstream of the fire.

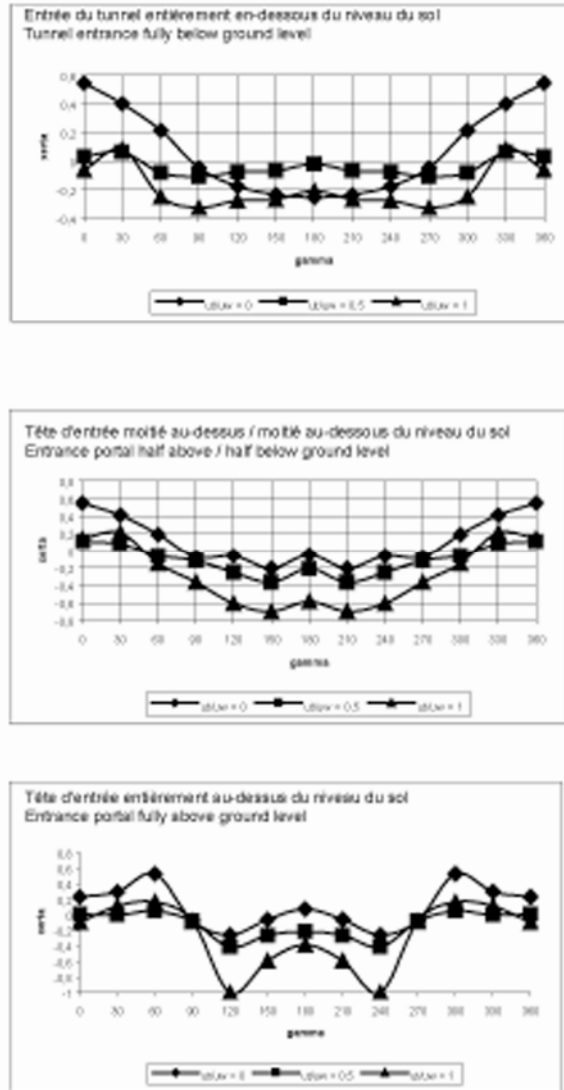


Figure 12.3.3 - Influence approximative du vent sur diverses configurations de tête

Conformément à la référence 15 la formule de la perte de charge provoquée par les véhicules bloqués peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta P_{veh} = n \cdot \frac{(c_w A)_{veh}}{A_T} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u_T^2 \quad \text{avec } n = \text{nombre de véhicules bloqués}$$

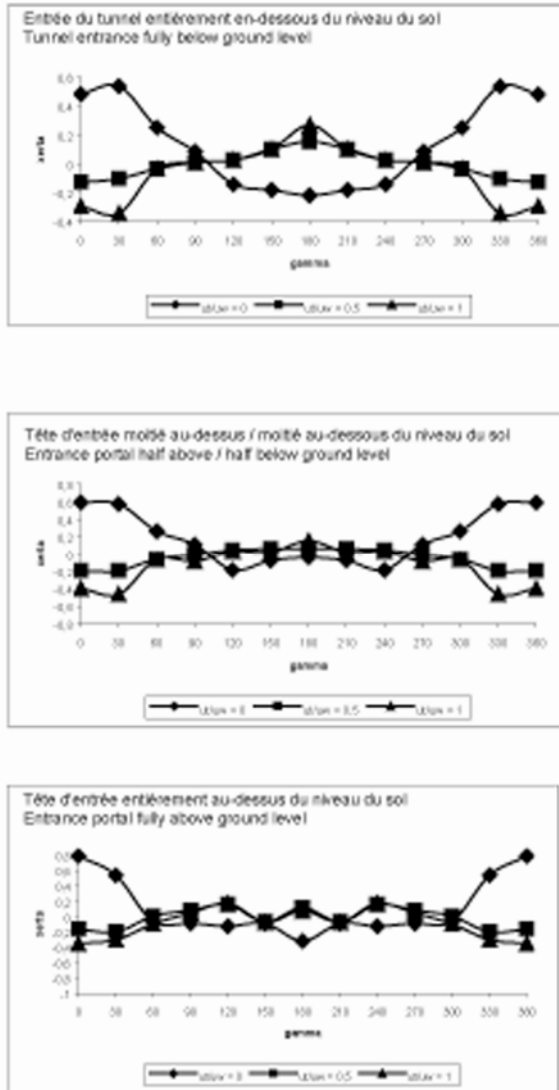


Figure 12.3.3 - Approximation of wind influence on various portal configurations

In accordance with reference 15 the formula for the pressure loss caused by blocked vehicles can be written as:

$$\Delta P_{veh} = n \cdot \frac{(c_w A)_{veh}}{A_T} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u_t^2$$

with n = number of blocked vehicles

Remarques :

Par mesure de précaution, il est bon de prendre en compte le volume de circulation correspondant aux heures de pointe

Dans certains pays, des mesures de précaution ont conduit à mettre en place une signalisation recommandant une certaine distance entre les véhicules (par exemple, 100 m) à l'intérieur du tunnel. Il est impossible, plus particulièrement en zone urbaine, d'espérer que les usagers se conformeront à cette mesure en cas d'accident ou d'incendie. Aucune leçon ne peut encore être tirée de cette expérience, mais il paraît sensé d'espérer que le taux d'occupation des voies sera alors notablement inférieur à la capacité normale (170 uvp/h) sauf en zone urbaine. En outre, une distance plus courte serait compensée par l'effet de sillage des véhicules. Dans le cas d'un tunnel interurbain, la valeur doit être évaluée cas par cas (par exemple 50 véh/km de voie).

On ne prend pas en compte le cas d'une congestion du trafic empêchant les véhicules de s'échapper du tunnel en aval de l'incendie, car on doit éviter toute poussée des fumées en direction des usagers bloqués. Il n'existe cependant aucune difficulté à prendre en considération la résistance des véhicules bloqués en amont, si bien que la ventilation peut repousser les fumées vers l'aval après évacuation des usagers.

#### ***Efficacité d'installation des accélérateurs***

En plus des informations données dans la référence 15, l'efficacité d'installation des accélérateurs implantés dans la tête d'entrée ou juste devant est supérieure à l'efficacité de ces mêmes ventilateurs implantés dans le tunnel. Les mesures réalisées aussi bien sur modèles que dans la réalité ont donné des efficacités proches de 100 %.

Lorsque les accélérateurs sont placés à faible hauteur au-dessus de l'espace de circulation, en combinaison avec un jet dirigé vers l'aval, les camions de grande hauteur peuvent bloquer leur jet.

Dans le cas où les accélérateurs sont montés longitudinalement, un par un, c'est souvent la poussée de seulement un ou deux accélérateurs qui se trouvera perturbée. Ce qui ne causera pas une diminution importante de la poussée totale.

Si les accélérateurs sont montés par groupes le long du tunnel, il ne faut pas s'attendre à ce que tous les ventilateurs à l'intérieur du même groupe soient moins efficaces. Le risque d'un camion stationnant sur chaque voie, dans la même position, juste dans le trajet de la propulsion d'un accélérateur, n'est pas réaliste. Il faut s'attendre à ce que seulement un ou deux accélérateurs du groupe soient moins efficaces.

Même les accélérateurs « bloqués » causeront encore une augmentation de charge bien que la propulsion du jet soit perturbée.

Remarks:

As a safety precaution it is advisable to take into account the traffic volume corresponding to the peak hours.

In some countries recent safety precautions led to the installation of signalling which promotes a spacing between the vehicles (e.g. 100 m) inside the tunnel. It is impossible, mainly in urban areas, to expect that all users will observe this precaution in case of accident or fire. No lesson can yet be drawn from the experience, but it seems sensible to expect that the occupation rate of the lanes will then be noticeably smaller than the normal capacity (170 uvp/h) except in urban areas. Moreover a smaller distance would be compensated partly by the wake effect of the vehicles. In the case of an inter-urban tunnel the value must be evaluated case by case (for instance 50 veh/km of lane).

The case of traffic congestion preventing the vehicles from escaping from the tunnel downstream of the fire is not accounted for, because any pushing of smoke onto the blocked users must be avoided. However, there is no difficulty in considering the resistance of vehicles blocked upwards so that ventilation can push down smoke after the users' evacuation.

### ***Installation Efficiency of Jet Fans***

Additional to the information in reference 15 the installation efficiency of jet fans located in or just in front of the entrance portal is higher than the efficiency of the same fans located in the tunnel. Measurement both in scale models and in reality showed installation efficiencies near 100%.

When the jet fans are located within a short height above the traffic room in combination with a downward-directed jet stream high lorries can block the jet propulsion of jet fans.

In case the jet fans are lengthwise mounted one by one in many cases the jet propulsion of only one or two jet fans will be disturbed. This will not cause a severe diminishing of the total jet thrust.

If the jet fans are mounted in groups along the tunnel it is not to be expected all jet fans within one group are less effective. The chance of a stationary truck on each lane at the same position just in the jet propulsion of a jet fan is not relevant. It is to be expected only one or two jet fans in a group are less effective.

Even the 'blocked' jet fans still cause a pressure rise in spite of the disturbed jet propulsion.



### 12.3.3 Exemple

#### Caractéristiques géométriques du tunnel

Longueur du tunnel	$L = 1200 \text{ m}$
Section transversale du tunnel	$A_T = 69 \text{ m}^2$
Périmètre de la section transversale du tunnel	$P = 32,5 \text{ m}$
Diamètre hydraulique du tunnel	$D_H = 8,50 \text{ m}$
Rampe du tunnel	$d = -0,02 \text{ (} = 2 \text{ \%)}$

#### Caractéristiques aérodynamiques

Taux massique de l'air	$\rho = 1225 \text{ kg/m}^3$
Coeff. de perte de charge linéaire ou coefficient de Moody	$\lambda = 0,020$
Perte de charge à l'entrée du tunnel	$\zeta = 0,4$
Nombre de Prandtl (air)	$Pr = 0,7$
Contre-charge atmosphérique	$\Delta Pa = 50 \text{ Pa}$
Accélération de la gravité	$g = 0,981 \text{ m/s}^2$
Vitesse du flux en tunnel	$u_0 = 4 \text{ m/s}$

#### Caractéristiques des accélérateurs

Vitesse de sortie moyenne des accélérateurs	$u_j = 30 \text{ m/s}$
Poussée fournie par un groupe d'accélérateurs	$F_j = 1500 \text{ N}$
Coefficient total d'installation des accélérateurs	$\eta = 0,85$

#### Caractéristiques thermiques

Puissance thermique de l'incendie	$Q = 200 \times 10^6 \text{ W}$
Chaleur massique de l'air	$c_p = 1009 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$
Emissivité des parois	$\varepsilon = 0,7$
Constante de Stefan–Boltzmann	$\sigma_0 = 5,68 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
Température superficielle du tunnel	$T_{\text{walls}} = 288 \text{ }^\circ\text{K}$

### 12.3.3 Example

#### Geometric Characteristics of the Tunnel

tunnel length	$L = 1,200 \text{ m}$
tunnel cross section	$A_T = 69 \text{ m}^2$
perimeter of the tunnel cross section	$P = 32.5 \text{ m}$
hydraulic diameter of the tunnel	$D_H = 8.50 \text{ m}$
tunnel gradient	$d = -0.02 (= 2\%)$

#### Aerodynamic Characteristics

air rate mass	$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$
linear pressure loss factor or Moody factor	$\lambda = 0.020$
pressure loss at the tunnel entrance	$\zeta = 0.4$
air Prandtl number	$Pr = 0.7$
atmospheric counter-pressure	$\Delta Pa = 50 \text{ Pa}$
gravity acceleration	$g = 0.981 \text{ m/s}^2$
tunnel flow speed	$u_0 = 4 \text{ m/s}$

#### Jet Fan Characteristics

average output velocity of jet fans	$u_j = 30 \text{ m/s}$
fan thrust supplied by a jet fan group	$F_j = 1,500 \text{ N}$
total installation factor of jet fans	$\eta = 0.85$

#### Thermal Characteristics

fire heat release rate	$Q = 200 \times 10^6 \text{ W}$
mass heat of air	$c_p = 1,009 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$
wall emissivity	$\varepsilon = 0.7$
Stefan–Boltzmann constant	$\sigma_0 = 5.68 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}^4$
tunnel surface temperature	$T_{\text{walls}} = 288 \text{ }^\circ\text{K}$

**Tableau 12.3.1 - Evolution longitudinale de la température de l'air pour l'exemple du paragraphe 12.3.3.**

Température (°K)	Distance foyer / entrée (m)
677	à 0
622	50
579	100
544	150
515	200
491	250
470	300
452	350
436	400
422	450
409	500
398	550
387	600
379	650
372	700
364	750
358	800
352	850
346	900
342	950
337	1000
333	1050
329	1100
326	1150
323	1200

**Tableau 12.3.2 - Variation des différentes pertes de charge le long du tunnel en fonction de l'emplacement du foyer d'incendie**

Pertes de charge (Pa)	Distance foyer / Entrée du tunnel (m)												
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200
$\Delta P_e$	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94
$\Delta P_f$	40,48	40,17	39,81	39,38	38,87	38,25	37,51	36,63	35,54	34,22	32,57	30,49	27,78
$\Delta P_s$	11,04	11,24	11,51	11,82	12,23	12,71	13,22	13,97	14,90	16,06	17,60	19,78	23,13
$\Delta P_{véh}$	0	4,65	9,30	13,95	18,60	23,25	27,89	32,54	37,19	38,73	38,83	38,73	38,73
$\Delta ch$	82,68	79,87	76,61	72,83	68,44	63,35	57,54	50,87	43,19	34,41	24,40	12,99	0
$\Delta P_a$	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$\Delta P_{exp}$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$\Delta P_{total}$	214	220	221	222	222	222	220	218	215	207	197	186	174

**Table 12.3.1 - Longitudinal evolution of the temperature of the air for the example of section 12.3.3**

Temperature (°K)	Distance fire / entrance (m)
677	à 0
622	50
579	100
544	150
515	200
491	250
470	300
452	350
436	400
422	450
409	500
398	550
387	600
379	650
372	700
364	750
358	800
352	850
346	900
342	950
337	1,000
333	1,050
329	1,100
326	1,150
323	1,200

**Table 12.3.2 - Variation of different pressure losses along the tunnel according to the location of the fire**

Pressure Losses (Pa)	Distance Fire / Entrance of the Tunnel (m)												
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200
$\Delta P_e$	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94
$\Delta P_f$	40.48	40.17	39.81	39.38	38.87	38.25	37.51	36.63	35.54	34.22	32.57	30.49	27.78
$\Delta P_s$	11.04	11.24	11.51	11.82	12.23	12.71	13.22	13.97	14.90	16.06	17.60	19.78	23.13
$\Delta P_{véh}$	0	4.65	9.30	13.95	18.60	23.25	27.89	32.54	37.19	38.73	38.73	38.73	38.73
$\Delta ch$	82.68	79.87	76.61	72.83	68.44	63.35	57.54	50.87	43.19	34.41	24.40	12.99	0
$\Delta P_a$	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$\Delta P_{exp}$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$\Delta P_{total}$	214	220	221	222	222	222	220	218	215	207	197	186	174