

IV.2 Ventilation longitudinale

En insufflant un jet d'air à l'intérieur du tunnel, la résistance du flux peut être surmontée en convertissant la quantité de mouvement du jet en pression statique. Lorsque l'on insuffle directement l'air en tunnel par des buses (type Saccardo), l'air extérieur est aspiré par la tête. Il peut l'être aussi par des ventilateurs implantés le long du tunnel et contribuant chacun à l'impulsion. Ces accélérateurs peuvent généralement travailler dans les deux directions.

IV.2.1 Poussée des accélérateurs

La conversion de la quantité de mouvement en surpression statique peut être calculée de la manière suivante :

$$\Delta p_{jo} = \rho \cdot Q_j \cdot (u_j - u^*) \cdot 1/A_T \quad (1)$$

L'augmentation idéale de pression Δp_{jo} selon (1) ne peut pas être entièrement atteinte en raison de plusieurs mécanismes de perte de charge. Les efficacités $\eta_1 - \eta_3$ expriment ces pertes, ramenant ainsi l'augmentation de pression à :

$$\Delta p_j = \Delta p_{jo} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3.$$

Des études sur les détails des différentes origines des pertes sont en cours et décrites dans la littérature [9,10] ; les principales valeurs sont les suivantes :

a) Performance du jet (η_1)

La force de poussée, mesurée à l'air libre en atmosphère calme sur un banc d'essai, est en moyenne inférieure de 20% à la quantité de mouvement calculée $\rho Q_j \cdot u_j$, dans laquelle Q_j est la quantité de flux mesurée. Les raisons en sont le tourbillon d'air à la sortie du ventilateur et la turbulence : $\eta_1 = 0,9$.

b) Frottement de paroi (η_2)

En fonction de la position du ventilateur à plusieurs diamètres de jet de la paroi ou du plafond, des pertes de charge se produisent pour des distances plus courtes. On a les valeurs types de η_2 suivantes pour des jets non déviés de diamètre d à différentes positions dans la section [9,10] :

Tableau 4.1

	η_2
1 jet dans un angle, bord du jet touchant pratiquement la paroi et le plafond	~ 0,7
1 jet, bord du jet à la sortie du ventilateur $_ d$ de la paroi et du plafond	~ 0,8
1 jet, bord du jet à la sortie du ventilateur $1 d$ de la paroi et du plafond	~ 0,9
1 jet entièrement dans une niche	~ 0,8
Nombreux jets entièrement dans une niche	~ 0,7

IV.2 Longitudinal ventilation

With the help of an air-jet placed in the tunnel air column, the flow resistance can be overcome by converting the jet momentum into static pressure. The air jets can be placed at the tunnel entrance (Saccardo), blowing outside air into the tunnel or as ducted fans along the tunnel, each one accelerating part of the tunnel air flow. These jet fans can work in both tunnel directions.

IV.2.1 Jet fan thrust

The conversion of momentum into static overpressure can be calculated as:

$$\Delta p_{jo} = \rho \cdot Q_j \cdot (u_j - u^*) \cdot 1/A_T \quad (1)$$

The ideal pressure raise Δp_{jo} according to (1) is not fully attainable due to several loss mechanisms. The efficiencies $\eta_1 - \eta_3$ express these losses, thus reducing the ideal pressure raise to:

$$\Delta p_j = \Delta p_{jo} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3.$$

Investigations on the details of the different loss sources are going on and should be followed in the technical literature [9, 10], the main values are:

a) Jet fan performance (η_1)

The thrust force, measured in the open in still air on a test bed is in the average 10 % smaller than the calculated momentum $\rho Q_j \cdot u_j$ where Q_j is the measured through-flow quantity. The reasons are air swirl at the fan exit and turbulence: $\eta_1 = 0,9$.

b) Wall friction (η_2)

Relative to a position of the jet fan several jet diameters away from the side wall or ceiling, additional wall friction losses occur for smaller distances. Typical η_2 values for undeflected jets of diameter d at different positions in the cross-section are [9, 10]:

Table 4.1

	η_2
1 jet in a corner, jet edge practically touching wall and ceiling	~ 0,7
1 jet, jet edge at fan exit 1/2 d away from wall and ceiling	~ 0,8
1 jet, jet edge at fan exit 1 d away from wall and ceiling	~ 0,9
1 jet totally in a niche	~ 0,8
Many jets totally in a niche	~ 0,7

En installant plusieurs lames de déflexion à la sortie du jet, on peut éviter le frottement immédiat du jet sur la paroi, augmentant ainsi les faibles valeurs η_2 du tableau 4.1 de 0,1 à 0,15. Par ailleurs, les déflecteurs introduisent une perte par turbulence dans le jet et réduisent le composant axial de celui-ci. Des déflecteurs sont toujours recommandés lorsque les accélérateurs sont placés dans des niches ou lorsque les surfaces des parois sont très rugueuses [9,10].

c) Distance longitudinale (η_3)

Le transfert de la quantité de mouvement du jet à la colonne d'air du tunnel demande une distance d'environ 10 diamètres hydrauliques du tunnel pour des accélérateurs sans déflecteurs. Sur cette distance minimale entre les accélérateurs, il ne doit pas y avoir d'obstacles de grandes dimensions sur le trajet du jet, comme par exemple des panneaux directionnels.

Avec des déflecteurs (déflexion de 5 à 10 degrés) on peut avoir un transfert de quantité de mouvement plus rapide et la distance minimale entre les accélérateurs peut être réduite à 6 à 8 diamètres hydrauliques de tunnel.

Pour ces distances η_3 est égal à 1, mais la valeur diminue rapidement avec des distances plus courtes.

d) Vitesse de l'air du tunnel u^*

Pour calculer le nombre d'accélérateurs nécessaires pour un trafic fluide avec un grand espace entre les véhicules, on peut prendre la valeur u^* de la formule (1) correspondant à la section transversale totale du tunnel. Pour le nombre d'accélérateurs nécessaires pour un trafic congestionné, il faut prendre en compte le blocage du tunnel par les véhicules et utiliser par conséquent une valeur u^* plus élevée (paragraphe IV.2.2).

e) Taille des ventilateurs

L'efficacité de la conversion de la quantité de mouvement de l'accélérateur $\rho Q_j u_j$ au courant d'air du tunnel Q de vitesse u dépend principalement du rapport de vitesse u_j/u conformément à l'expression $\eta = [2/(1+u_j/u)] \cdot \eta_{1-3}$ [20]. Pour les vitesses de jet habituelles d'environ 30 m/s, l'efficacité est d'environ 20%. Ainsi, la principale possibilité d'améliorer une efficacité relativement faible consiste à réduire le rapport u_j/u , c'est-à-dire réduire la vitesse u_j . (L'efficacité de l'accélérateur lui-même est un autre facteur de perte).

Pour augmenter substantiellement le transfert de la quantité de mouvement du jet, il faut abaisser la vitesse du jet à 20 m/s et moins. Ceci signifie des accélérateurs de grand diamètre, et en grand nombre, ce qui augmente non seulement le prix par accélérateur, mais aussi le coût du câblage électrique, puisque le nombre de sections transversales pourvues d'accélérateurs est plus grand. Dans les cas où il faut agrandir la section transversale pour abriter des accélérateurs plus grands, les coûts de construction s'en trouvent augmentés. Dans tout tunnel important ventilé longitudinalement, il est bon d'équilibrer les coûts initiaux, les coûts d'entretien et la consommation d'énergie en fonction des prévisions de circulation.

L'hélice d'un accélérateur est bruyante lorsque la vitesse de sortie de l'air est grande. Des silencieux sont alors nécessaires des deux côtés. Avec des jets de faible vitesse, le niveau de bruit peut respecter les exigences posées sans qu'il soit nécessaire de recourir à des silencieux.

By applying several deflection blades at the jet exit, the immediate impingement of the jet on the wall can be hindered, thus increasing the low η_2 values of table 4.1 by 0,1 to 0,15. On the other hand the deflectors introduce a turbulent loss into the jet and reduce the axial component of the jet. For jet fans in niches or tunnels with a very rough surface, deflectors are always useful [9, 10].

c) Longitudinal distance (η_3)

The transfer of the jet momentum to the tunnel air column needs about 10 hydraulic tunnel diameters distance for jet fans without deflectors. In this minimum distance between jet fans, there should be no large obstacles in the jet path such as direction boards.

With deflectors (5 - 10 degrees jet deflection) a quicker momentum transfer can be achieved and the minimum distance between jet fans can be reduced to 6 - 8 hydraulic tunnel diameters.

For these distances η_3 equals 1, but the value decreases quickly with shorter distances.

d) Tunnel air velocity u^*

For calculating the number of jet fans in a free flowing traffic with ample space in between the cars, the u^* value of formula (1) can be taken corresponding to the total tunnel cross-section. For the number of jet fans in congested traffic the tunnel blockage by the cars must be considered and thus a higher u^* value used (section IV.2.2).

e) Fan size

The efficiency of the conversion of the jet fan momentum $\rho Q_j u_j$ into the tunnel air flow Q with its velocity u is mainly dependant on the velocity ratio u_j/u according to the expression $\eta = [2/(1+u_j/u)] \cdot \eta_{1-3}$ [20]. For the usual jet velocities around 30 m/s the efficiency is about 20 %. Thus, the main possibility to improve the relatively low efficiency is in the reduction of the ratio u_j/u , that is reducing the outflow velocity u_j . (The ventilator efficiency of the jet fan itself is a further loss factor).

A substantial efficiency increase in this jet momentum transfer requires a lowering of the jet velocity to 20 m/s and below. This in turn means large diameter jet fans and many of them. This not only increases the price per jet fan, but also of the electric cabling, as the number of cross-sections with jet fans increases. In situations, where the tunnel cross-section has to be increased to house the larger fans additional construction costs occur. In each important tunnel project with longitudinal ventilation it is advisable to look for a balance between initial costs, maintenance costs and energy consumption following the traffic prediction.

The propeller in a jet fan becomes noisy when it has to create a large exit velocity. This requires silencers on both sides of the propeller. With low velocity jets the noise may meet the noise requirements without silencers.

IV.2.2 Nombre d'accélérateurs

Le nombre d'accélérateurs à installer dans un tunnel est basé sur les besoins en pression dans un certain nombre de conditions différentes de volume de circulation et de vitesse dans chaque sens et les besoins correspondants en air frais, ainsi que sur les effets de pression météorologique et de pression thermostatique. Un autre critère est la vitesse minimale de l'air en tunnel pour repousser la fumée vers une tête en cas d'incendie.

En accumulant toutes les situations défavorables, on peut déterminer le nombre d'accélérateurs. Il est possible de réduire la simultanéité de tous les effets en estimant, pour chacun d'entre eux, la probabilité de son apparition.

La pression à surmonter par les n_j accélérateurs se compose de

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

Les influences individuelles sont calculées avec les formules suivantes :

a) Pistonnement ou effet de traînée par voie de circulation

$$\Delta p_{veh} = \left[\frac{M \cdot L}{V} \right] \cdot \frac{(c_w A)_{veh}}{A_T} \cdot \frac{\rho}{2} (v \pm u)^2$$

Pour chaque voie de circulation, il faut considérer séparément la densité de voitures particulières et de camions/bus et la vitesse de circulation.

Tableau 4.2

Voitures de tourisme :	Section transversale $A = 2 \text{ m}^2$	
	Coefficient de résistance $c_w = 0,35$	(avec effet de blocage $c_w = 0,4$)
Camions :	Section transversale $A = 3 - 5 - 7 \text{ m}^2$	
	Coefficient de résistance $c_w = 0,8$	(avec effet de blocage $c_w = 1$)

Le coefficient de résistance c_w d'un véhicule roulant librement est augmenté de 15 à 25% en raison de l'effet de blocage du tunnel [9,10]. Pour le parc automobile européen, la section transversale aérodynamique moyenne est presque 2 m^2 , elle peut être plus faible dans d'autres pays. Pour les camionnettes de livraison en trafic urbain, la valeur A se situe aux alentours de 3 à 5 m^2 , pour les camions elle est d'environ 7 m^2 .

Si le trafic est congestionné ou arrêté, les voitures sont si près les unes des autres qu'il se produit un effet d'ombre. Les essais montrent une diminution de la valeur $c_w A$ qui passe, dans certaines conditions, à 70% des valeurs ci-dessus pour un trafic congestionné roulant à 10 km/h . L'augmentation de la résistance à l'air due à un flux venant de l'arrière du véhicule est également incluse dans cette valeur. Les voitures de tourisme dans le sillage des camions ont aussi une résistance moindre [9,10].

La vitesse $v \pm u$ est la vitesse relative entre celle du trafic en mouvement v et celle du courant d'air u dans le même sens ou en sens inverse.

IV.2.2 Number of jet fans

The number of jet fans to be installed in a tunnel is based on reviewing the pressure demands of a variety of situations with different traffic volumes and velocities in each direction and the corresponding fresh air requirements as well as meteorological, thermostatic pressure effects. A further criterion is a minimum tunnel air velocity for pushing smoke to one side of a tunnel fire.

By accumulating all unfavourable situations a maximalization of the number of jet fans takes place. By estimating for each effect the probability of its occurrence the simultaneity of all effects can be reduced. This probabilistic approach is described in [9].

The pressure to be overcome by the n_j jet fans is composed of

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

The individual influences may be calculated by the formulas:

a) Piston or drag effect per traffic lane:

$$\Delta p_{veh} = \left[\frac{M \cdot L}{V} \right] \cdot \frac{(c_w A)_{veh}}{A_T} \cdot \frac{\rho}{2} (v \pm u)^2$$

For each traffic lane the corresponding traffic density of passenger cars and trucks, buses and the traffic velocity must be regarded separately.

Table 4.2

Passenger cars:	Cross-section $A = 2 \text{ m}^2$	
	Coefficient of resistance $c_w = 0,35$	(with blockage effect $c_w = 0,4$)
Trucks:	Cross-section $A = 3 - 5 - 7 \text{ m}^2$	
	Coefficient of resistance $c_w = 0,8$	(with blockage effect $c_w = 1$)

The free field car resistance coefficient c_w is increased by 15 to 25 percent due to the blockage effect of the tunnel [9, 10]. For the Western European passenger car park the average aerodynamic cross-section is nearly 2 m^2 , in other countries it may be a smaller value. For delivery vans in a city traffic the A-value lies around $3 - 5 \text{ m}^2$, for trucks it is around 7 m^2 .

In a congested traffic or at standstill, the cars are so near to each other, that a shadow effect takes place. Tests show a reduction of the $c_w A$ value, under certain conditions, to 70 % of the above values in congested traffic up to 10 km/h. The increase of air resistance due to a flow from behind the car is also included in this value. Passenger cars in the wake of trucks have even a lower resistance [9, 10].

The velocity $v \pm u$ stands for the relative velocity between v of the moving traffic in or against the direction of the air flow u .

b) Résistance aéroulique du tunnel

$$\Delta p_{tu} = \left[1 + \zeta + \lambda \frac{L}{D} \right] \rho / 2U^2$$

La valeur 1 est la perte de pression minimale pour créer la pression dynamique de la vitesse de l'air u , ζ est ajouté pour la perte de pression additionnelle due à la forme de l'entrée. Une entrée évasée donne $\zeta = 0,1$, une entrée normale à arêtes vives donne $\zeta = 0,5$. On suppose en outre qu'il ne se produit aucune récupération de la pression dynamique au portail en sortie de tunnel.

Le coefficient de friction λ du tunnel inclut la rugosité de la paroi ainsi que les équipements habituels qui font saillie dans le tunnel (éclairage, signalisation, etc.). Dans des tunnels à revêtement en béton lissé, on a souvent mesuré des valeurs λ de 0,015. Dans les tunnels sans revêtement et présentant des surfaces très rugueuses, on peut trouver des valeurs λ allant jusqu'à 0,06. Ces pertes de pression locales doivent être ajoutées au facteur général de friction dans les tunnels possédant de grands panneaux directionnels.

c) Contre-pressions météorologiques et thermostatiques

Dans les tunnels courts, il faut compter avec des contre-pressions produites par des vents permanents sur la tête exposée. L'emplacement de la tête dans son environnement - y compris les habitations - est d'une grande importance et doit être estimé, dans les cas critiques, à l'aide d'essais sur maquette [9,10].

Dans les tunnels de grande longueur présentant une déclivité importante, la pression thermostatique (effet de cheminée) doit également être vérifiée.

d) Désenfumage

La ventilation longitudinale doit pouvoir repousser les fumées d'un côté du foyer et éviter une remontée importante de celles-ci. Cette valeur dépend de la taille de l'incendie de dimensionnement, de la section transversale du tunnel et du nombre de voitures arrêtées dans le tunnel.

Des essais récents en vraie grandeur, basés sur des incendies de voitures et de bacs d'essence (essais EUREKA et essais du Memorial Tunnel), sont en cours d'analyse pour connaître la charge thermique, la température et la propagation des fumées, la stabilité de leur stratification, etc. Le Groupe de Travail AIPCR n°6 "Incendie et Désenfumage" produira des recommandations sur les données spécifiques des différents incendies de dimensionnement.

b) Resistance of the tunnel tube:

$$\Delta p_{tu} = \left[1 + \zeta + \lambda \frac{L}{D} \right] \rho / 2U^2$$

The value 1 stands for the minimum pressure loss to create the dynamic pressure of the tunnel air velocity u , ζ is added for the additional pressure loss due to the shape of the portal. A bellmouth entrance has $\zeta = 0,1$, a normal sharp edged entrance has $\zeta = 0,5$. It is further assumed that no recuperation of the dynamic pressure at the exit portal takes place.

The friction coefficient λ of the tunnel includes wall roughness as well as the usual installations protruding into the tunnel (lighting, signalling, etc.). In a tunnel with a smooth concrete wall overall λ -values of 0,015 have often been measured. In tunnels with unlined walls and very rough surface structures λ -values up to 0,06 may occur. In tunnels with several large direction boards these local pressure losses must be added to the general friction factor.

c) Meteorological, thermostatic counterpressures

In shorter tunnels counterpressures by steady winds on an exposed portal must be considered. The location of the portal relative to its surrounding topography, including houses, are of great influence and should be assessed in critical cases by model tests [9, 10].

In longer tunnels with a substantial gradient the thermostatic pressure (chimney effect) must be checked also.

d) Smoke control

The longitudinal ventilation must be able to push smoke to one side of the fire and avoid a substantial back-layering. Such a value depends on the design fire size, the tunnel cross-section and the number of stranded cars in the tunnel.

Recent full scale tests with cars and petrol pools (EUREKA- and Memorial-Tunnel tests) are now being analysed in view of the heat load, smoke temperatures and smoke propagation, stability of the stratification etc. The PIARC Working Group No. 6 on "Fire and Smoke Control" will eventually recommend the specific data for different design fires.

IV.2.3 Recyclage de l'air

Un recyclage important de l'air peut se produire entre la tête de sortie et l'entrée du tunnel voisin dans le cas de deux tubes unidirectionnels, en fonction de la géométrie locale et de la direction du vent. Le même problème existe entre la tête de sortie et la prise d'air frais d'une station de ventilation semi-transversale. Dans les tunnels courts à auto-ventilation élevée, cet effet peut ne pas être important, mais par contre il doit être combattu dans les tunnels de grande longueur. Plusieurs essais sur maquette et en vraie grandeur [10,21] ont donné les résultats suivants :

Absence de vent

1. Avec deux têtes de tunnel à la même hauteur et une distance entre les parois voisines de 1 m, 15% environ de l'air sortant d'un tunnel est aspiré comme air frais dans l'entrée voisine. Si l'interdistance entre les deux parois est portée à 4 m, le recyclage ne concerne plus que 2% de l'air.
2. Une paroi de séparation entre les deux têtes (espacées de 1 m) réduit efficacement le recyclage : avec une paroi de même hauteur que les tunnels et de 5 à 10 m de long, le recyclage est réduit respectivement à 4% et 2%.
3. En allongeant la tête de sortie du tunnel de 5 à 10 m, le recyclage est encore inférieur à ce qu'il est avec une paroi de séparation.

Effets du vent

Le recyclage augmente fortement si le vent pousse l'air sortant du tunnel vers l'entrée voisine.

- Dans le cas numéro 1, avec un côté exposé à un vent soufflant à la demi-vitesse ou à la même vitesse que le jet sortant, le recyclage peut atteindre 30% en moyenne, avec une pointe à 60%.

Si les deux têtes et la section de route à l'air libre adjacente se trouvent dans un renforcement ou entre des parois, un vent latéral crée un vortex sur la portion de route libre, qui se traduit par un recyclage important dans les deux cas de vent latéral.

- Dans le cas numéro 2, avec une paroi de séparation de 20 ou 40 m, le recyclage atteint un maximum de 40 ou 20% respectivement avec un côté défavorable au vent, mais il n'y a pratiquement pas de recyclage pour toutes les autres directions du vent.
- Dans le cas numéro 3, où les deux têtes sont séparés dans le sens de l'axe du tunnel, les effets du vent ne peuvent être réduits que si la tête d'entrée se trouve en arrière de la tête de sortie. Si la tête d'entrée est en avant de la tête de sortie, le jet d'air du tube sortant remonte vers l'entrée et y est fortement repris.

IV.2.3 Recirculation

Between the exit portal and the neighbouring entry portal of two uni-directionally used tunnels a substantial air recirculation may take place, depending on the local geometry and wind direction. The same problem exists between exit portal and fresh air intake of a semi-transverse ventilation station. In short tunnels with high self-ventilation this may be of no concern, but in longer tunnels this effect should be reduced. Several model and full-scale tests [10, 21] gave the following findings:

No wind

1. With two tunnel portals at the same height and a distance between the neighbouring walls of 1 m, about 15 % of the outflowing tunnel air is sucked in as fresh air into the neighbouring entry portal. When the distance between the two neighbouring walls is increased to 4 m, the recirculation goes down to 2 %.
2. A division wall between two tunnel portals (1 m spaced) effectively reduces recirculation: with a wall-height equal to the tunnel height and a wall length of 5 or 10 m, the recirculation reduces to 4 % or 2 % respectively.
3. By elongating the exit tunnel portal 5 to 10 m, even less recirculation takes place relative to the case of a division wall.

Wind effects

Recirculation strongly increases when a wind pushes the outflowing tunnel air jet towards the neighbouring entry portal.

- In the case number 1 a side on wind with 1/2 or the same velocity as the outflowing jet brings the recirculation on the average to 30 % with a peak at 60 %.
When the two portals and the adjoining open road section are in a recess or in between walls, a side wind creates a vortex over the open road section, what also results in a high recirculation in both side wind situations.
- In the case number 2 with a division wall of 20 m or 40 m length the recirculation has a maximum of 40 % or 20 % respectively with an unfavorable side on wind, but practically no recirculation in all other wind directions.
- In the case number 3 where two tunnel portals are separated in the tunnel axis direction, wind effects can only be reduced, when the entry portal is in back of the exit portal. When the entry portal is in front of the exit portal, the tunnel air jet flows up to the entry portal and is taken in there quite strongly.