

III. ENVIRONNEMENT

III.1 Air vicié sortant par la tête du tunnel

Le Rapport de 1991 pour le Congrès de Marrakech donne les informations de base sur le comportement d'un jet d'air dans le tunnel sous l'influence de la circulation, du vent et de la topographie. Un modèle de trajectoire de dispersion est proposé pour calculer la dispersion de l'air du tunnel autour de la tête.

Des essais récents sur maquette avec simulation de la circulation montrent que la longueur initiale de la trajectoire de dispersion varie entre 100 et 300 m, en fonction de la vitesse du véhicule, de la vitesse et de la direction du vent [11]. Des essais récents en vraie grandeur avec gaz traceur confirment l'approche par modélisation [12].

La concentration en NO_2 à l'issue de la dispersion dépend des émissions de NO_x dans le tunnel et du niveau d'ozone dans l'air extérieur. Les valeurs types NO_2/NO_x se situent entre 5 et 20%, la moyenne aux alentours de 10% [13].

Dans des situations critiques en tête de tunnel, les effets locaux du vent sur la dilution peuvent être estimés à l'aide d'essais sur modèle ou de calculs de flux tridimensionnels [14].

III.2 Air vicié sortant par une cheminée

Si l'air du tunnel est renvoyé verticalement dans l'atmosphère par une cheminée, les gaz d'échappement se trouvent fortement dilués et ne peuvent plus être mesurés au sol. Ceci a été démontré par des essais avec gaz traceur [15] et des programmes informatiques appropriés, par exemple ISCST [16] ; Complex 1 [17] le montre également.

Cette dilution importante est due à la phase initiale du jet qui fait remonter les gaz d'échappement jusqu'à des altitudes élevées en les diluant en chemin, la dispersion atmosphérique prenant ensuite le relais.

L'influence de la cheminée et les paramètres météorologiques sont résumés dans les encadrés 1 à 5, basés sur les formules de Briggs [18] (voir aussi la liste des symboles).

La hauteur effective de la cheminée se compose de la hauteur réelle de la cheminée au-dessus du sol augmentée du parcours du jet après sa sortie de la cheminée, comme défini par Briggs. Le vent crée, du côté sous le vent de la cheminée, une dépression qui tend à aspirer vers le bas une partie de l'air vicié. Ceci peut être évité si la vitesse de l'air du tunnel est supérieure à 1,5 fois la vitesse locale du vent.

L'air du tunnel est normalement plus chaud que l'air extérieur, sauf en été. Cependant, ces quelques degrés de différence ont peu d'effet sur la quantité de mouvement du jet.

Le bruit du jet lui-même ne présente pas de problèmes de nuisance pour les alentours avec des vitesses de jet inférieures à 25 m/s dans des conditions normales et 15 m/s dans les zones particulièrement sensibles.

Il faut également prendre en compte l'énergie nécessaire pour donner au jet une vitesse élevée.

III. ENVIRONMENT

III.1 Tunnel air out of a portal

The 1991 congress report for Marrakech gives the basic information on the behaviour of a tunnel air jet under the influence of traffic, wind and topography. For calculating the dispersion of the tunnel air around the portal, a volume source model is proposed.

Recent model tests with imitation of the moving traffic show that the initial length of the volume source varies between 100 to 300 m, depending on the vehicle speed, wind velocity and direction [11]. Recent full scale tests with tracer gas confirm the modelling approach [12].

The initial NO₂-concentration in the volume source depends on the NO_x-emission in the tunnel and the outside air ozone level. Typical NO₂/NO_x -values are between 5 and 20 %, the average around 10 % [13].

In critical portal situations the local wind effects on the dilution can only be assessed by model tests or by three dimensional flow calculations [14].

III.2 Tunnel air out of a chimney

By sending tunnel air through a chimney vertically into the atmosphere, the tunnel exhaust gases are strongly diluted and not measurable on the ground. This has been proven by tracer gas tests [15] and appropriate computer programs such as ISCST [16], Complex1 [17] shows this also.

This strong dilution is due to the initial jet phase which lifts the exhaust gases into higher altitudes, also diluting them on the way up, and from where the atmospheric dispersion takes over.

The influence of the chimney and weather parameters are summarized in the boxes 1 to 5, which are based on the Briggs formulas [18] (see also list of symbols).

The effective chimney height is composed of the physical chimney height above ground plus the jet rise after the chimney exit as given by Briggs. Wind creates on the lee side of the chimney an underpressure which tends to suck part of the exhaust air down. This can be avoided when the tunnel air exit velocity exceeds 1,5 times the local wind velocity.

Tunnel air normally is warmer than outside air except in spring weather. However, these few degrees of temperature difference have little effect relative to the jet momentum.

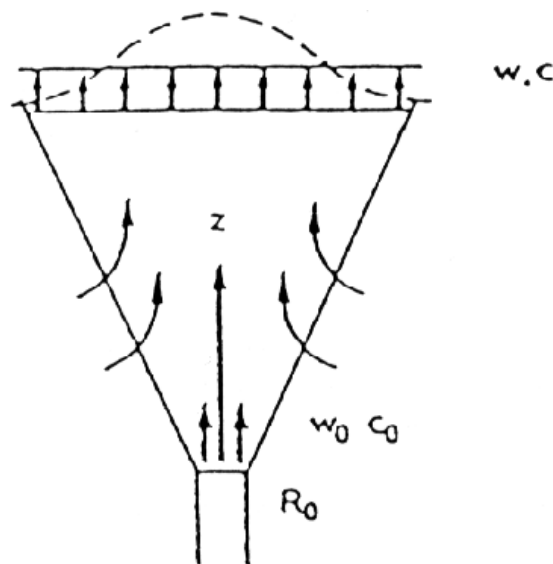
The noise of the jet stream itself is no problem for the surrounding with jet velocities below 25 m/s in normal situations and 15 m/s in especially sensitive areas.

Also considered must be the energy demand of a high velocity tunnel air jet.

. Atmosphère neutre / *Neutral atmosphere*
 . sans vent / *without wind*

remontée / *rise* $\Delta h = 6,25 \cdot \frac{R_0 w_0}{w}$,avec $w = 1 \text{ m/s}$

concentrations $c / c_0 = \frac{1}{1 + 0,16 z / R_0} = \frac{1}{1 + w_0 / w}$



exemple $Q_0 = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ $w_0 = 13 \text{ m/s}$ $R_0 = 2,5 \text{ m}$
example

$$\Delta h = 6,25 \frac{2,5 \cdot 13}{1} = 200 \text{ m}$$

$$c / c_0 = \frac{1}{1 + 13/1} = 0,07 = 7\%$$

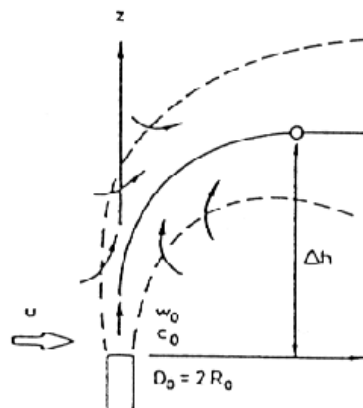
. Atmosphère neutre / *Neutral atmosphere*
 . avec vent / *with wind*

remontée / *rise* $\Delta h = 3 D_0 \frac{w_0}{u}$

$$z/D_0 = 1,44 \cdot \left[\frac{w_0}{u} \right]^{2/3} \cdot \left[\frac{x}{D_0} \right]^{1/3}$$

concentrations $c / c_0 = \frac{1}{1 + 0,16 \frac{u}{w_0} \cdot \frac{z^2}{R_0^2}}$

$$c / c_0 = \frac{1}{1 + 5,7 \frac{w_0}{u}} \quad \text{à } z = \Delta h$$



exemple $Q_0 = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ $w_0 = 13 \text{ m/s}$ $D_0 = 5 \text{ m}$ $R_0 = 2,5 \text{ m}$ $u = 3 \text{ m/s}$
 example

$$\Delta h = 3 \cdot 5 \cdot \frac{13}{3} = 65 \text{ m}$$

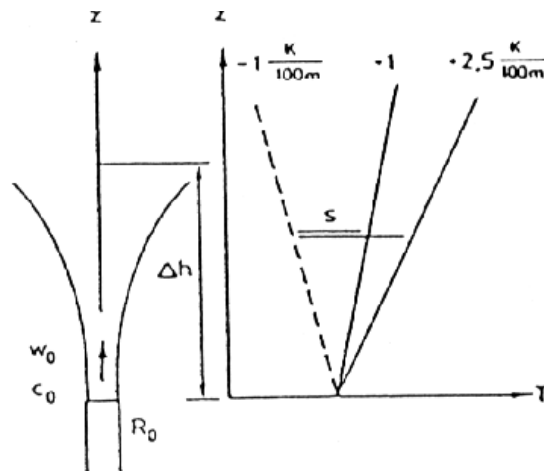
$$c / c_0 = \frac{1}{1 + 5,7 \cdot 13/3} = 0,039 \cong 4\%$$

- Atmosphère stable / *Stable atmosphere*
- sans vent / *without wind*

remontée / *rise* $\Delta h = 4 \left(R_0^2 w_0^2 \right)^{1/4} \cdot \frac{1}{S^{1/4}}$

$$S = \frac{g}{T} \cdot \frac{\delta \theta}{\delta z} = \frac{g}{T} \left(0,01 + \frac{\delta T}{\delta Z} \right)$$

concentrations $C / C_0 = \frac{1}{1 + 0,16 \Delta h / R_0}$



exemple / *example* $Q_0 = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ $W_0 = 13 \text{ m/s}$ $R_0 = 2,5 \text{ m}$

$$\frac{\delta T}{\delta z} = 0,01 \text{ K/m} \quad T = 280 \text{ K}$$

$$s = \frac{9,81}{280} \cdot 0,02 = 7 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta h = 4 \cdot \left(2,5^2 \cdot 13^2 \right)^{1/4} \cdot \frac{1}{\left(7 \cdot 10^{-4} \right)^{1/4}} = 140 \text{ m}$$

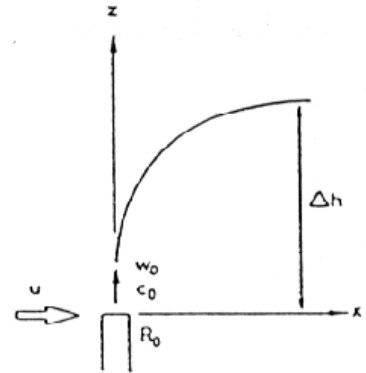
$$C / C_0 = \frac{1}{1 + 0,16 \cdot 140 / 2,5} = 0,1 = 10 \%$$

Encadré 4 / Box 4

- Atmosphère stable / *Stable atmosphere*
- avec vent / *with wind*

remontée / *rise* $\Delta h = 1,5 (R_0^2 W_0^2)^{1/3} \cdot \frac{1}{S^{1/6}}$

$$S = \frac{g}{T} \cdot \frac{\delta \theta}{\delta z} = \frac{g}{T} \left(0,01 + \frac{\delta T}{\delta Z} \right)$$



concentrations $C / C_0 = \frac{1}{1 + 0,16 \frac{u}{W_0} \cdot \frac{\Delta h^2}{R_0^2}}$

exemple / *example* $Q_0 = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ $W_0 = 13 \text{ m/s}$ $R_0 = 2,5 \text{ m}$

$\frac{\delta T}{\delta z} = 0,01 \text{ k/m}$ $T = 280 \text{ K}$ $u = 3 \text{ m/s}$

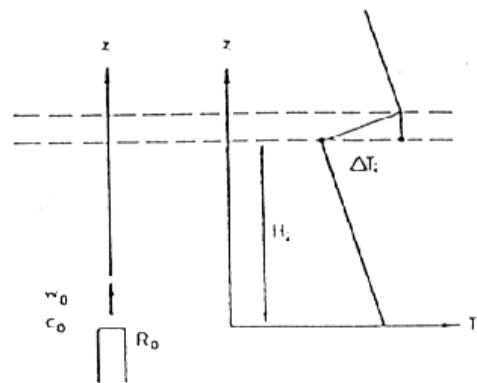
$s = \frac{9,81}{280} \cdot 0,02 = 700 \cdot 10^{-6}$ $\Delta h = 1,5 \left(\frac{2,5^2 \cdot 13^2}{3} \right)^{1/3} \cdot \frac{1}{(700 \cdot 10^{-6})^{1/6}} = 35 \text{ m}$ $c/c_0 = 12 \%$

Encadré 5 / Box 5

- Inversion élevée / *Elevated inversion*
- sans vent / *without wind*

remontée / *rise* $H_1 \leq 1,6 \left(\frac{R_0^2 W_0^2}{g \frac{\Delta T_i}{T}} \right)^{1/3}$

concentrations $C / C_0 = \frac{1}{1 + 0,16 \Delta h / R_0}$



exemple / *example*

$Q_0 = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ $W_0 = 13 \text{ m/s}$ $R_0 = 2,5 \text{ m}$ $\Delta T_i = 1 \text{ K}$ $T = 280 \text{ K}$

$$H_1 \leq 1,6 \left(\frac{2,5^2 \cdot 13^2}{9,81 \cdot \frac{1}{280}} \right)^{1/3} = \leq 50 \text{ m}$$

$$C / C_0 = \frac{1}{1 + 0,16 \cdot 50 / 2,5} = 0,24 = 24 \%$$

III.3 Filtration des particules de l'air vicié

Au Japon, sur de nombreuses routes, le trafic des poids lourds à moteur diesel atteint 30% et plus. Les tunnels sur ces routes ont des besoins beaucoup plus importants en air pour diluer les particules diesel que pour diluer le CO. Dans les grands tunnels de montagne ou les tunnels immergés au Japon, ceci a conduit au concept de traitement de l'air dans plusieurs stations réparties le long du tunnel, ce qui permet l'économie de grandes cheminées ou de gaines pour remplacer l'air pollué par l'air frais extérieur.

Le traitement de l'air est basé sur des précipitateurs électrostatiques (EP), un équipement qui a été bien testé dans les grandes centrales de conditionnement de l'air. Le premier système de traitement EP pour un tunnel a été installé au Japon en 1977, suivi par plus de 25 autres tunnels japonais.

Ces équipements ont été conçus pour des vitesses de passage de l'air de 7 m/s et peuvent résister à l'atmosphère hautement corrosive du tunnel pendant plusieurs années. L'efficacité d'élimination des poussières est d'environ 80%.

Plusieurs étapes sont nécessaires entre l'enlèvement des poussières sur le collecteur et leur élimination définitive ; le lavage à l'eau est la solution préférée.

La perte de charge dans une station EP est d'environ 1 000 à 1 500 Pa. La perte de charge dans la section EP elle-même est relativement faible, les pertes principales se situent dans les passages étroits du by-pass. La solution alternative, qui consiste à installer sur le site d'un épurateur EP un échange complet de l'air avec l'extérieur (enlèvement de l'air vicié du tunnel et remplacement par de l'air extérieur), demande une puissance installée des ventilateurs plus importante et une consommation en énergie plus élevée [19].

Les installations EP pour la protection de l'environnement présentent rarement un intérêt réel. Une exception peut être un tunnel très empoussiéré, par exemple à cause des pneus à clous, ou la sortie de l'air dans une zone urbaine à forte densité de population ou une station de vacances (3 installations de cette sorte ont par exemple été installées en Norvège).

III.3 Tunnel air particle filtering

In Japan many roads have 30 % and more heavy goods traffic by diesel-motor trucks. Tunnels in such roads need several times more air for diesel-smoke particle dilution than for CO dilution. In long alpine or underwater tunnels in Japan, this has led to the concept of cleaning the tunnel air in several stations along the tunnel, thus saving on large shafts or duct work to replace polluted air with fresh outside air.

The tunnel air cleaning is based on electrostatic precipitators (EP), a well tested equipment in large air conditioning plants. The first EP cleaning system for a tunnel was installed in 1977 in Japan, to be followed by more than 25 other Japanese tunnels.

They have been developed for through-flow velocities of 7 m/s and withstand the highly corrosive tunnel atmosphere for several years. The dust removal efficiency is around 80%.

Several steps are needed between removing the dust from the collector and getting a transportable dust package, a water cleaning process is a preferred solution.

The pressure loss through an EP station is around 1'000 to 1'500 Pa. The pressure loss in the EP section itself is relatively small, the main losses are in the narrow air passages of the EP by-pass configuration. The alternative solution to install at the site of an EP-cleaner a total air exchange with the outside (removing saturated tunnel air and replacing it by outside air) needs a larger installed fan power and a higher energy consumption [19].

EP installations for environmental protection have hardly any merit. An exception may be a very dusty tunnel, e.g. due to the effect of spikes, and the tunnel air outlet in a densely populated city section or a vacation resort (e.g. 3 such installations have been installed in Norway).

III.4 Traitement gazeux de l'air vicié

Les composants gazeux des gaz d'échappement tels que CO, NO, NO₂, SO₂, CxHy ne peuvent pas être éliminés par un système EP. Dans l'espoir de trouver une solution générale, quelques instituts et sociétés travaillent sur le problème du traitement gazeux. La méthode par catalyse et la méthode biologique sont toujours en cours d'étude.

Dans le système par catalyse, les composants gazeux sont transformés dans un pot catalytique à froid en gaz neutres. Les détails de ce processus ne sont pas entièrement connus. Des essais réels ont montré que, au moins pour une période courte, on peut obtenir une bonne efficacité d'élimination pour CO, NO, NO₂, SO₂ et CxHy. Mais les catalyseurs doivent être régénérés très fréquemment et ils perdent progressivement leur efficacité, devant ainsi être remplacés. Le type actuel de catalyseurs est très coûteux.

Plusieurs autres méthodes ont été testées au Japon, en premier lieu pour éliminer NO_x, près d'une cheminée de tunnel. Tous les systèmes se sont révélés applicables, mais ils présentent des coûts d'installation et de fonctionnement très variables.

Avec la méthode biologique, les composants toxiques des gaz d'échappement sont éliminés par des micro-organismes. Les essais ont donné de bons résultats pour le CO et des résultats médiocres, jusqu'à présent, pour le NO, en particulier dans le cas de basses températures de l'air (ce qui pourrait nécessiter une installation de chauffage de l'air du tunnel). Un traitement efficace demande un contact relativement prolongé entre l'air et l'agent biologique, ce qui a pour conséquence des installations de très grandes dimensions. Un autre inconvénient est le panache de vapeur par temps froid, l'air étant saturé de vapeur d'eau comme dans une tour de refroidissement.

Dans l'état actuel des connaissances, les essais sur usine pilote montrent qu'il existe des possibilités pour un traitement des effluents gazeux, mais aucune installation en vraie grandeur n'a été actuellement réalisée pour prouver son efficacité réelle.

III.4 Tunnel air gaseous cleaning

The gaseous exhaust components such as CO, NO, NO₂, SO₂, CxHy cannot be eliminated by an EP cleaning system. In the hope of finding an allround solution, some institutes and companies work on the gaseous cleaning problem. So far the catalytic and the biological cleaning method are of interest.

In the catalytic system the gaseous components are transformed in a cold catalyst to harmless gases. Details of this process are not fully clear yet. Tests with tunnel air showed that, at least for a short time, good separation efficiencies are attainable for CO, NO, NO₂, SO₂ and CxHy. The disadvantage is that the catalysts have to be regenerated quite frequently and steadily loose in efficiency, and eventually they have to be replaced. The present type of catalysts are very expensive.

In Japan several other methods, primarily to eliminate NO_x out of the tunnel air have been tested next to a tunnel air chimney. All systems proved to be feasible, but they varied considerably in installation and running costs.

With the biological method the harmful exhaust components should be eliminated by micro organisms. Tests with tunnel air gave good results concerning CO and mediocre results so far with NO, especially with low air temperatures (what may need a heating installation for the tunnel air). An efficient cleaning demands a relatively long contact time between the air and the biological agent which results in very large installations. Another disadvantage is the vapor plume in cool weather, as the air becomes saturated with water vapor as in a cooling tower.

The present state of the art is that pilot plant tests show possible ways for gaseous cleaning, but full scale installations which have to prove their practicality have not been realized yet.