



Ministère
de l'Équipement,
des Transports
et du Logement

Direction
des routes



LE TRAITEMENT DE L'AIR DES TUNNELS ROUTIERS

Etat des connaissances sur les études
et les réalisations

J.P. MARSAULT
Octobre 1999

Centre d'Études des Tunnels

TRAITEMENT DE L'AIR DES TUNNELS ROUTIERS

SOMMAIRE

1 - PRÉSENTATION	1
2 - NATURE DE LA POLLUTION - ASPECT REGLEMENTAIRE TYPES DE TRAITEMENTS ENVISAGÉS	2
2.1 - LA POLLUTION À PRENDRE EN COMPTE	2
2.2 - ASPECT RÉGLEMENTAIRE	2
2.3 - TYPES DE TRAITEMENTS ENVISAGÉS	2
3 - LA FILTRATION DE L'AIR DES TUNNELS	3
3.1 - OBJECTIFS DE LA FILTRATION	3
3.2 - CONTRAINTES LIÉES AUX CARACTÉRISTIQUES DE L'AIR À TRAITER	3
3.3 - RÉALISATIONS DE FILTRATION DE L'AIR DES TUNNELS AU JAPON	5
3.3.1 - Description d'une installation de filtration	5
3.3.2 - Equipements auxiliaires pour la régénération des filtres	6
3.3.3 - Liste des tunnels japonais équipés	7
3.3.4 - Equipement mixte : unités de filtration et puits	8
3.3.5 - Filtres électrostatiques installés en plafond	9
3.3.6 - Implantation d'une unité de filtration à l'extraction	9
3.4 - RÉALISATIONS DE FILTRATION DE L'AIR DES TUNNELS EN NORVEGE	10
3.4.1 - Première réalisation : Le OSLO - TUNNEL - Système de filtration au pied de la cheminée d'extraction	11
3.4.2 - Installation type	12
3.4.3 - Système de filtration dans un "by-pass"	13
3.4.4 - Système de filtration au plafond	13
4 - LE TRAITEMENT DES GAZ DES REJETS DES TUNNELS	14
4.1 - LES PREMIÈRES MÉTHODES TESTÉES AU JAPON	14
4.2 - ÉTUDES EFFECTUÉES EN ALLEMAGNE POUR LE TUNNEL DE L'ELBE À HAMBOURG	15
4.3 - ESSAIS EFFECTUÉS EN AUTRICHE	15
4.4 - ÉTAT DES RECHERCHES EN NORVÈGE	16
5 - TRAITEMENTS ASSOCIÉS DES PARTICULES ET DES GAZ	18
5.1 - ÉTUDE EN COURS AU JAPON	18
5.2 - RÉSULTATS DE RECHERCHE EFFECTUÉE EN ALLEMAGNE	21
5.3 - UNITÉS DE TRAITEMENTS ASSOCIÉS ENVISAGÉES EN NORVÈGE	22
5.4 - AUTRE TYPE DE PROCÉDÉ DE TRAITEMENT ÉTUDIÉ EN FRANCE	23
6 - ÉTUDE DE CAS	24
6.1 - OBJECTIFS ET ORIENTATIONS DE L'ÉTUDE	24
6.2 - ENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX TIRÉS DE L'ÉTUDE	24
6.3 - CONCEPTION DES INSTALLATIONS PROPOSÉES	25
6.4 - DONNÉES CHIFFRÉES CORRESPONDANT À CES PROPOSITIONS	27
6.5 - COÛTS ESTIMATIFS	27
7 - CONCLUSIONS	28
BIBLIOGRAPHIE	31

1 - PRESENTATION

Les tunnels routiers permettent de réduire localement les nuisances dues à la circulation réparties le long de l'itinéraire. Mais dès qu'ils sont d'une certaine importance par leur longueur ou leur trafic, ils doivent être ventilés mécaniquement afin de maintenir la pollution à des niveaux admissibles à l'intérieur de l'ouvrage. Le principe de cette ventilation est de diluer les gaz d'échappement avant de les rejeter à l'extérieur. On peut alors observer localement au voisinage des rejets des stations de ventilation et des sorties, des concentrations en polluants d'origine automobile qui sont, pendant certaines périodes, nettement supérieures à celles rencontrées habituellement à l'air libre.

L'évaluation et la limitation de cet impact sont des volets importants des études de ventilation, en particulier en site urbain. Parfois des associations de riverains se constituent pour veiller au respect de la qualité de l'air de leur environnement et réclamer l'épuration de l'air rejeté.

C'est une idée séduisante, dans le cadre plus général de la lutte contre la pollution due aux transports, de profiter de cette circonstance où les gaz d'échappement sont canalisés par le tunnel pour envisager de les traiter et de diminuer ainsi d'autant la pollution totale due au trafic.

Des recherches sur le traitement de l'air des tunnels routiers sont en cours dans différents pays. L'élimination par filtration des particules en suspension a déjà été réalisée dans de nombreux ouvrages au JAPON depuis 1978 et aussi plus récemment en NORVEGE. Le traitement des polluants gazeux est beaucoup plus difficile mais plusieurs procédés font l'objet d'études dans différents pays.

Le propos de cette note est de rassembler les éléments existants sur ce sujet et de les exploiter afin d'en tirer des enseignements concernant :

- le but, les objectifs précis de ces réalisations,
- les types de polluants traités,
- les technologies utilisées et leur rendement,
- les moyens mis en oeuvre et les contraintes qui en résultent,
- les coûts d'investissement et d'exploitation.

La prise en compte de ces considérations permettra de se faire une idée sur le développement et l'intérêt réel de tels équipements dans l'état actuel des connaissances et des enjeux ; mais il est très difficile de conclure de manière péremptoire en raison des contraintes et des coûts importants que génère le recours au traitement de l'air des tunnels. On verra également que les applications actuelles de ces méthodes sont davantage orientées vers des problèmes de ventilation, en particulier pour les tunnels longs, que vers le traitement des rejets afin de protéger l'environnement.

2 - NATURE DE LA POLLUTION - ASPECT REGLEMENTAIRE TYPES DE TRAITEMENTS ENVISAGES

2.1 - La pollution à prendre en compte

Les polluants visés par la réglementation sur les émissions des véhicules automobiles sont : le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures (HC), les oxydes d'azote (NO_x) et les particules en suspensions (PS).

L'évolution de ces limites d'émissions des véhicules neufs, le renouvellement progressif du parc automobile avec une augmentation de la part des moteurs diesels, se traduit par une diminution du rôle du CO, longtemps traceur idéal de la pollution d'origine automobile au profit d'autres polluants comme les fumées (visibilité en tunnel) et les NO_x.

2.2 - Aspect réglementaire

Il n'existe pas de texte réglementaire concernant les rejets de tunnel et les concentrations en polluants qui les caractérisent sont de très loin inférieures à celles des rejets industriels réglementés.

Toutefois la dispersion des rejets de tunnel n'est pas immédiate et peut engendrer une pollution locale préjudiciable aux proches riverains, comme c'est parfois également le cas pour des voies à forte circulation. Il y a donc lieu de se poser le problème du respect des normes concernant la qualité de l'air ambiant au voisinage des tunnels.

En France, le décret n°98- 360 du 6 mai 1998 (JO du 13 mai 1998 - Environnement) fixe des objectifs de la qualité de l'air, des seuils d'alerte et des valeurs limites, pour les sept polluants suivants : dioxyde d'azote, particules fines et particules en suspension, le plomb et le dioxyde de soufre, l'ozone, le monoxyde de carbone et le benzène.

D'autres polluants sont fréquemment cités lorsqu'on évoque le rôle des transports dans la pollution atmosphérique locale : les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les composés organiques volatiles ; mais ils ne sont pas visés par la réglementation sur les émissions et leur prise en compte est d'autant plus difficile qu'on ne possède pas d'informations suffisantes sur leur toxicité, permettant de définir des seuils admissibles d'exposition.

2.3 - Types de traitements envisagés

Les études et les réalisations sur le traitement de la pollution des tunnels se répartissent en deux grandes familles :

- la filtration, traitement de la pollution particulaire : fumée, suies et poussières ;
- le traitement des effluents gazeux avec comme polluants ciblés : le CO et le CO₂, le NO et le NO₂, parfois le SO₂, les COV et certains HC.

3 - LA FILTRATION DE L'AIR DES TUNNELS

3.1 - Objectifs de la filtration

- Les renseignements sur la filtration de l'air des tunnels proviennent surtout d'études et de réalisations effectuées au Japon où il existe de nombreux tunnels équipés.

Dans la majorité des cas, il s'agit de tunnels longs où l'opacité due aux fumées pourrait atteindre des niveaux très élevés, car la proportion de véhicules utilitaires diesel dans le trafic global y est importante. La filtration de l'air a pour but de le régénérer avant de le réinsuffler en tunnel où il va jouer à nouveau un rôle dans la dilution des fumées. Cela permet de limiter le renouvellement en air frais extérieur, donc d'économiser sur la réalisation de puits ou de galeries de ventilation.

Si la ventilation du tunnel est le premier objectif des installations de filtration, celles-ci ont aussi bien sûr des effets positifs pour l'environnement. D'ailleurs, il faut signaler qu'un dispositif de filtration a été installé dans le puits vertical à la sortie d'un tunnel court à ventilation longitudinale ; mais il s'agit d'une des plus anciennes réalisations de filtration en tunnel au JAPON (1978) et ce procédé ne semble pas avoir été reconduit.

- D'après les renseignements recueillis sur la première installation de filtration opérationnelle en NORVEGE, au tunnel d'OSLO, sa justification répond à un problème particulier : "L'expérience norvégienne en matière de tunnels routiers à grande circulation démontre que la production de poussière peut s'avérer très importante pendant certaines périodes de l'hiver et du printemps, essentiellement à cause de l'utilisation de pneus à clous.

Les tunnels ont beau être équipés de cheminées d'évacuation de l'air pollué, les particules restent un problème dans les zones entourant les cheminées. C'est pour cette raison que l'on a installé un système de récolte de la poussière".

Dans cette première réalisation, en 1990, la filtration est effectuée au niveau de la cheminée d'extraction et ne concerne donc que les rejets d'air pollué du tunnel. Depuis il semble que les objectifs aient évolué, puisque les études se sont orientées vers de petites unités de filtration réparties dont le premier objectif est d'améliorer la visibilité en tunnel ; il leur serait également adjoint des dispositifs de traitement du NO₂. C'est donc bien un problème de pollution en tunnel et donc de ventilation qui justifie le recours au traitement de l'air et cela semble particulièrement s'appliquer dans le cas de tunnels de grande longueur.

3.2 - Contraintes liées aux caractéristiques de l'air à traiter

Les ingénieurs norvégiens annoncent des valeurs de 2 à 3 mg/m³ en été et 6 à 9 mg/m³ en hiver, ce qui semble des valeurs très élevées au regard des concentrations en particules mesurées en France, qui sont pour la plupart du temps inférieures à 1mg/m³. En fait, ces teneurs varient avec l'itinéraire, la nature du trafic et d'autres conditions. Elles sont constituées de fumées et de suies provenant des émissions des moteurs diesel, mais aussi

de poussières provenant de l'usure de la chaussée, des véhicules, des pneus, et qui sont de granulométrie plus élevée.

Du fait de la diversité de leurs provenances, les particules que l'on cherche à éliminer sont de tailles très différentes, depuis les plus petites : submicroniques, jusqu'aux plus grosses qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de microns.

Ces dernières sédimentent rapidement et sont éliminées lors des nettoyages des tunnels. On peut si nécessaire envisager de les recueillir par des systèmes de filtration mécanique ou par inertie.

Les suies et les fumées provenant des émissions ont une granulométrie beaucoup plus faible, souvent comprise entre 0,1 et 0,8 μm . La meilleure méthode envisageable pour les éliminer avec un bon rendement est le recours à des précipitateurs électrostatiques. Le schéma de principe en est donné par la figure suivante, extraite d'une publication.

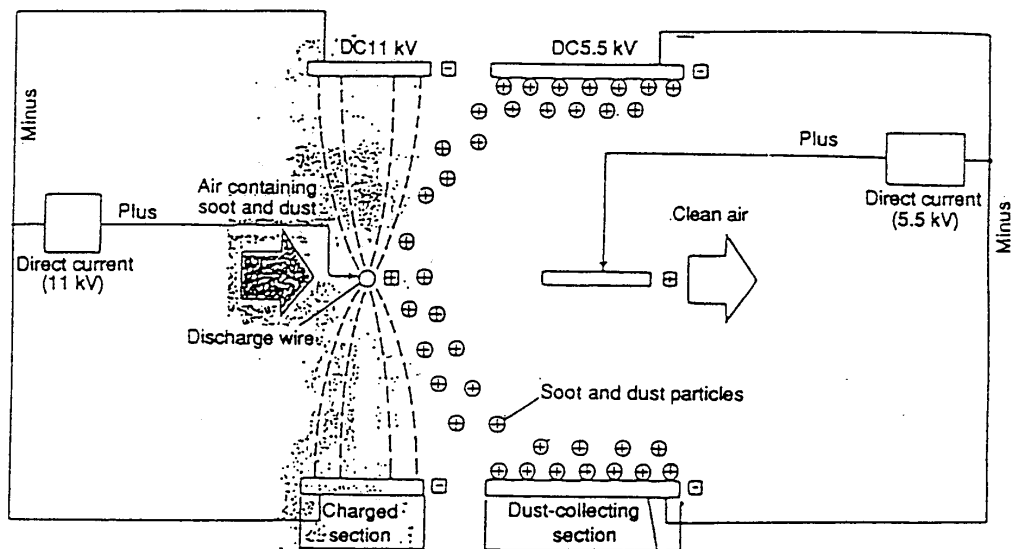


Figure 1 : Schéma de principe d'un précipitateur électrostatique

L'efficacité de la filtration dépend d'un certain nombre de paramètres. Des mesures ont montré que le rendement diminuait rapidement lorsque la vitesse de circulation dans le filtre augmente. En tunnel on a mesuré des rendements de 50 à 85 % (exprimés en terme de concentration massique) pour une vitesse de l'ordre de 7 m/s ; et plus si l'on diminue la vitesse.

3.3 - Réalisations de filtration de l'air des tunnels au JAPON

3.3.1 - Description d'une installation de filtration

Une installation type implantée dans une dérivation de tunnel est illustrée par la figure 2. Ses dimensions peuvent atteindre 150 m de longueur et 50 m² de section transversale pour un débit d'air traité de l'ordre de 200 à 250 m³/s.

Ce dispositif adopté en plusieurs exemplaires dans les tunnels longs (KAN-ETSU TUNNEL, ENASAN TUNNEL) permet d'améliorer la visibilité en tunnel. Il peut être combiné avec des puits qui par un apport d'air frais permettent aussi de diminuer les teneurs en polluants gazeux si cela s'avère nécessaire.

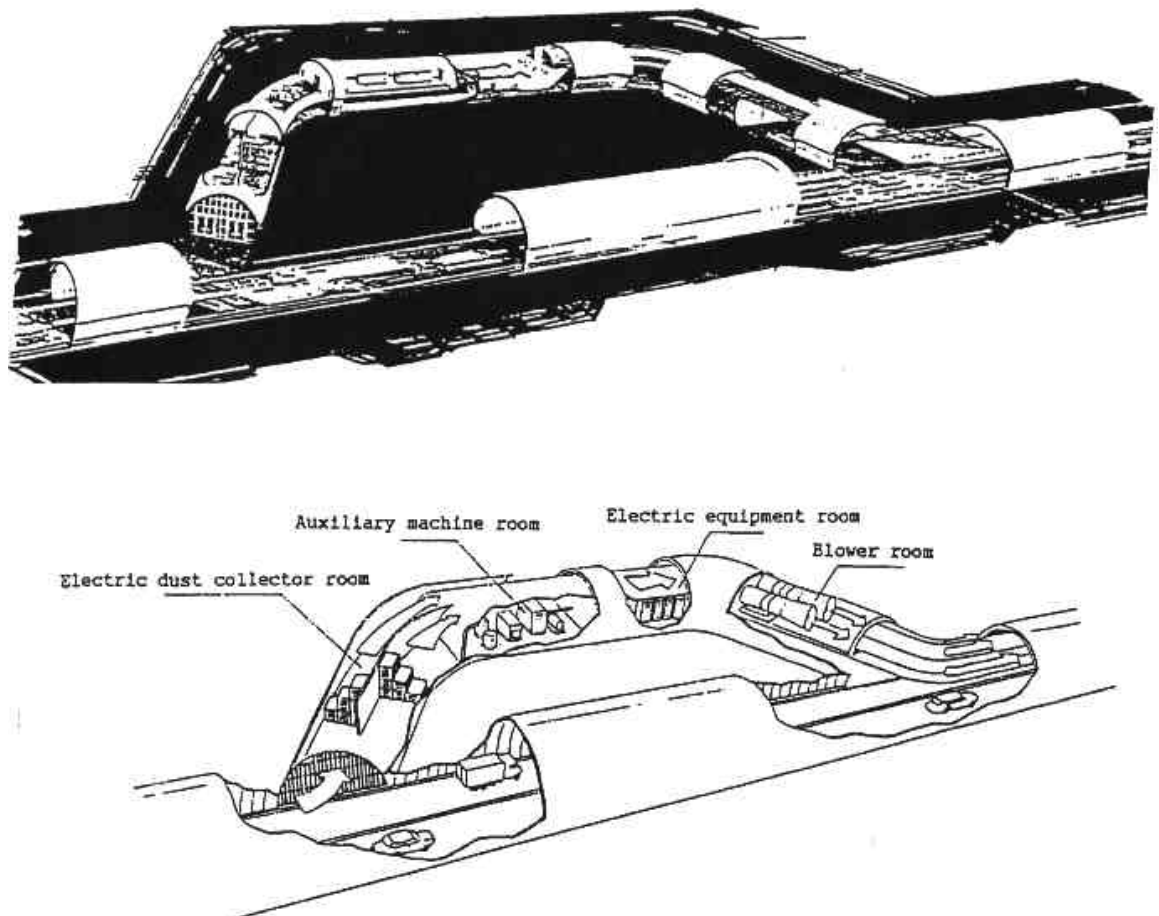


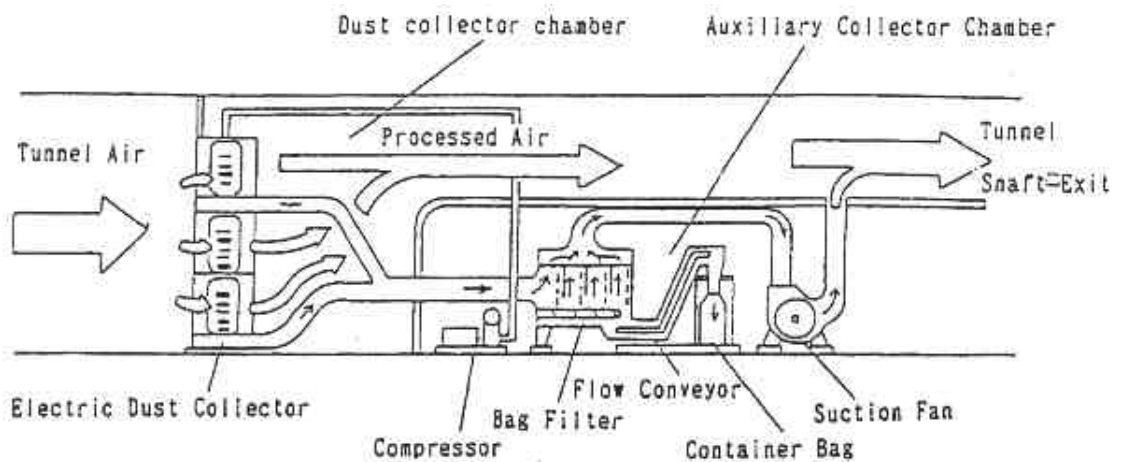
Figure 2 : Vue générale et schéma d'une installation de filtration en tunnel

3.3.2 - Équipements auxiliaires pour la régénération des filtres

Indépendamment de la partie filtration proprement dite, des équipements auxiliaires sont nécessaires pour la régénération des filtres qui peut se faire soit par voie sèche (air comprimé), soit par voie humide (lavage). Dans les deux cas, cela nécessite un nouveau dispositif soit de filtration, soit de sédimentation-déshydratation et une récupération des résidus.

Les équipements correspondants aux 2 principes de régénération des filtres sont illustrés par les figures suivantes.

3a Régénération par voie sèche (air comprimé)



3b Régénération par voie humide (lavage des plaques)

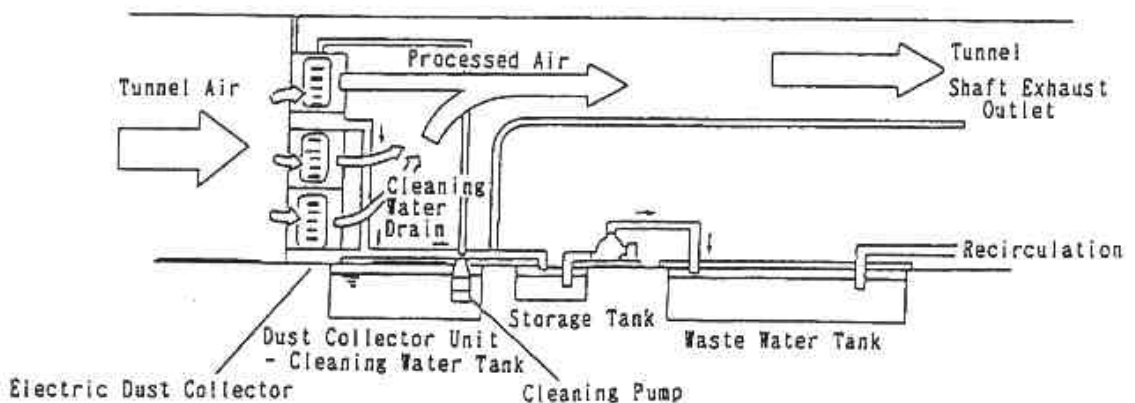


Figure 3 : Les deux principes de régénération des filtres

3.3.3 - Liste des tunnels japonais équipés

Le tableau suivant (établi en 1996) présente une liste des tunnels japonais équipés de systèmes de filtration, avec quelques unes de leurs principales caractéristiques. On constate que la régénération des filtres par lavage semble s'être imposée pour les réalisations les plus récentes, ce qui s'est confirmé depuis.

N°	Année	Nom du tunnel et de l'itinéraire	Longueur en m	Nb d'unité de traits	Débit traité en m ³ /s	Régénération des filtres
1	1978	Tsuruga tunnel on Hokuriku Expressway	2935	1	240	Air
2	1985	Enasan tunnel on Chuo Expressway	8649	4	735	Air
3	1985	Down line (1st-stage construction line) of Kan-etsu tunnel on Kan-etsu Expressway	10926	5	975	Air
4	1986	Sekido Tunnel on Sanyo Expressway	8825	3	720	Air
5	1987	Uji tunnel on Keishi Bypass		3	750	Air
6	1988	Up line of Fukuchiyama tunnel on Kyushu Expressway		1	285	Air
7	1988	Down line of Fukuchiyama tunnel on Kyushu Expressway		2	555	Air
8	1988	Up line of Kongosan tunnel on Kyushu Expressway	2200	1	285	Air
9	1988	Ichiburi tunnel on Hokuriku Expressway		2	585	Air
		Nou tunnel on Hokuriku Expressway		1	165	Eau
9	1988	Koshirazu tunnel on Hokuriku Expressway		2	364	Eau
		Takanomine tunnel on Hokuriku Expressway		1	184	Eau
10	1989	Kongosan tunnel on Sanyo Expressway	2200	1	195	Air
11	1991	Up line (2nd-stage construction line) of Kan-etsu tunnel on Kan-etsu Expressway		4	1140	Eau
12	1991	Takigadake tunnel on Sanyo Expressway		1	270	Eau
13	1992	Suribachiyama tunnel on Trans-Chugoku Expressway		1	195	Eau
14	1993	Aida Tunnel on Nagano Expressway		1	225	Eau
15	1993	Yatsuzakeyama tunnel on Jo-etsu Expressway		2	465	Eau
	1993	Kasaiyama tunnel on Sanyo Expressway (up line and down line)		6	1365	Eau

LISTE ET CARACTERISTIQUES CONNUES DE TUNNELS JAPONAIS EQUIPES DE PRECIPITATEURS ELECTROSTATIQUES

3.3.4 - Equipement mixte : unités de filtration et puits

La figure ci-dessous schématise l'installation de ventilation du KAN-ETSU-TUNNEL qui comprend 5 unités de filtration et 2 puits permettant des échanges avec l'extérieur.

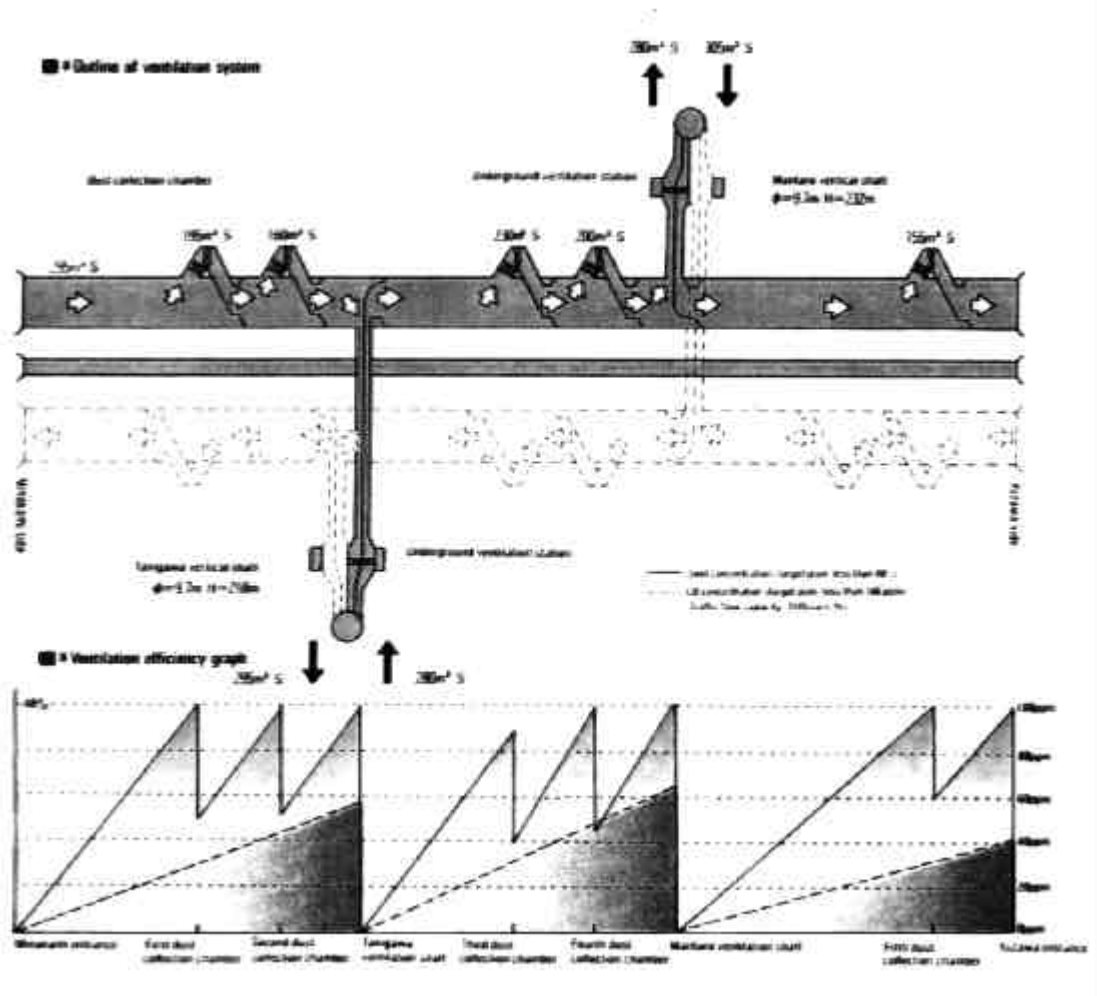


Figure 4 : Ventilation mixte du KAN-ETSU-TUNNEL
(Le diagramme montre l'efficacité du traitement de l'air et de la ventilation sur les évolutions en tunnel de la visibilité et de la concentration en CO)

3.3.5 - Filtres électrostatiques installés en plafond

Cette solution peut être adoptée pour des raisons de conception des tunnels, liées en particulier à la nature des terrains. Elle évite la construction de rameaux de dérivation ou "by-pass".

Les équipements nécessaires pour l'alimentation et la régénération des filtres sont identiques à ceux décrits en 3.3.1 mais ils sont implantés dans un élargissement latéral en tunnel, comme le montre la figure suivante.

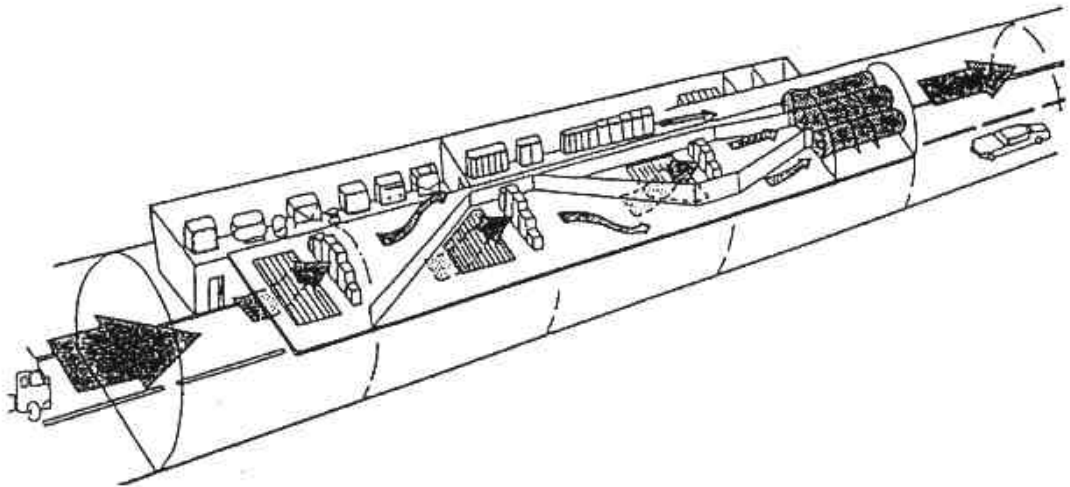


Figure 5 : Filtres électrostatiques en plafond

3.3.6 - Implantation d'une unité de filtration à l'extraction

C'est le seul cas à notre connaissance dans un tunnel japonais, d'une unité de filtration au niveau du rejet d'air vicié et donc justifié par des préoccupations d'environnement. C'est aussi l'une des plus anciennes et il s'agit d'un tunnel relativement court.

La figure suivante montre l'implantation du précipitateur électrostatique à l'entrée de la cheminée de rejet d'air vicié dans le tunnel HINOYAMA (longueur 1360 m à ventilation longitudinale).

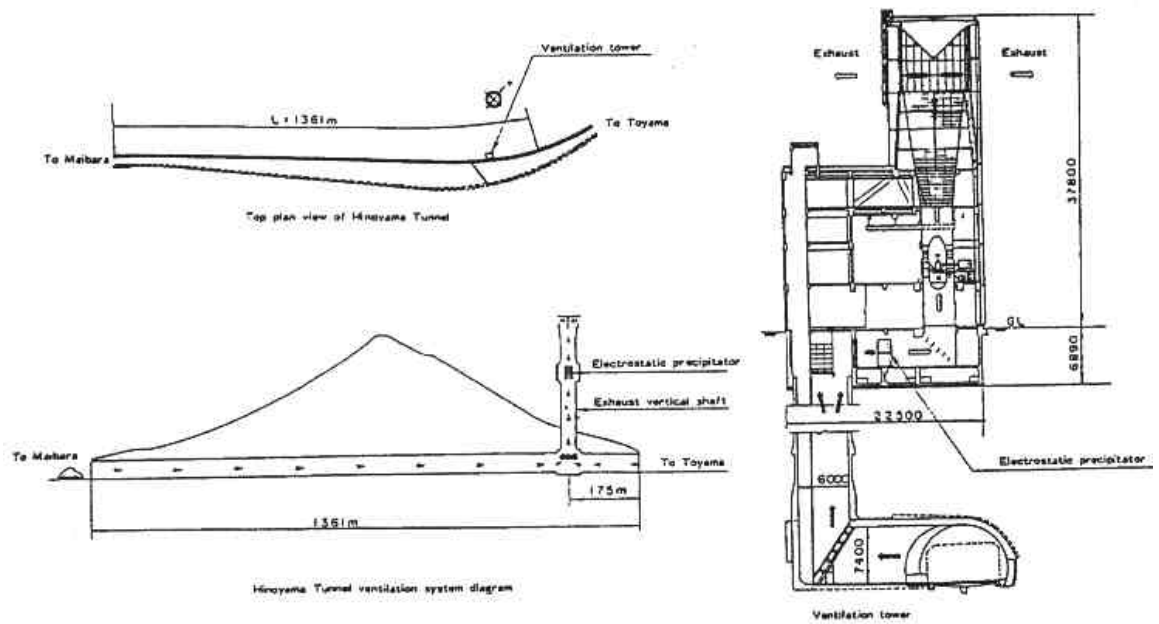


Figure 6 : Implantation dans un puits vertical en sortie de tunnel

3.4 - Réalisations de filtration de l'air des tunnels en NORVEGE

Un programme de recherche sur le traitement de l'air des tunnels a démarré en NORVEGE en 1989, par l'étude de la filtration des particules solides.

Actuellement 4 tunnels sont équipés dont 3 à OSLO et on peut noter une évolution dans l'implantation des systèmes de filtration : d'abord en cheminée, puis dans des rameaux ou by-pass et enfin en plafond.

Tunnel	Date de la mise en service	Implantation de la filtration	Longueur en mètres	Nombre de tubes
OSLO - TUNNEL (OSLO)	1990	Cheminée	1800	2
GRANFOSS - TUNNEL (OSLO)	1992	By-pass	2300	2
EKEBERG - TUNNEL (OSLO)	1995	By-pass	1500	2
HELL - TUNNEL (GJEVINGSASEN)	1995	Plafond	3880	1

D'autres études sont en cours : le tunnel de BERGEN-ROAD ; mais aussi un tunnel de 24 km de long, bidirectionnel mais à faible trafic, situé entre AURLAND et LAERDAL dans l'ouest de la NORVEGE (ventilation longitudinale avec un seul puits à 18 km de l'une des têtes).

3.4.1 - Première réalisation : Le OSLO - TUNNEL - Système de filtration au pied de la cheminée d'extraction

Comme cela a déjà été mentionné, l'utilisation intense des pneus cloutés à certaines périodes de l'année, peut conduire à des taux d'empoussièrement très élevés en tunnel en Norvège. Ceci justifie l'intérêt particulier porté à la filtration des rejets.

La première réalisation a été le tunnel d'OSLO. Il est situé sur une artère principale passant sous le centre ville et comprend 2 tubes de 1800 m de longueur. A son ouverture en 1990 le TMJA était de 60 000 véhicules. La ventilation est de type longitudinale (1000m³/s). Malgré la présence de deux tours de 20 à 30 mètres de hauteur, destinées à évacuer et à favoriser la dilution de l'air pollué, le dépôt de particules a été jugé excessif dans leur environnement. Pour y remédier et améliorer la qualité de l'air en ville, il a été prévu de filtrer l'air des rejets.

L'installation de filtration est installée au pied de la cheminée d'extraction. L'air vicié traverse d'abord un préfiltre en treillis métallique destiné à retenir les particules les plus grosses puis un précipitateur électrostatique qui se présente sous forme d'un "mur" de cellules élémentaires. La régénération des filtres se fait par lavage par pulvérisation d'eau distribuée par des rampes, puis séchage à l'air chaud. L'eau de lavage est décantée puis envoyée à la mer tandis que les boues résiduelles sont évacuées vers une décharge.

"Des mesures ont montré l'effet nettement positif sur les zones situées à proximité des tours de ventilation et dans l'environnement urbain."

3.4.2 - Installation type

Une installation de filtration en tunnel comprend généralement :

- un premier étage constitué par un filtre à inertie.

Il est destiné à retenir les particules les plus grosses et à protéger le filtre électrostatique.

Ces particules sont collectées par un circuit spécial qui les achemine vers un réservoir, comme le montre la photo ci-contre.

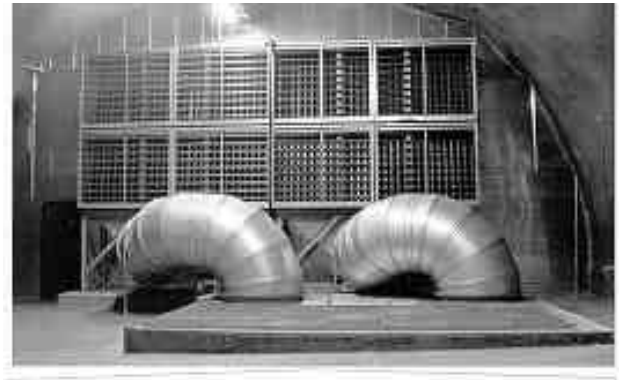


Figure 7 : Filtre à inertie et collecteurs

- Un second étage de filtration constitué par un précipitateur électrostatique.

Il est constitué de modules élémentaires juxtaposés pour utiliser au mieux toute la section de passage.

On aperçoit sur la photo les rampes pour le lavage du filtre et en bas une rigole pour l'évacuation des eaux.



Figure 8 : Le précipitateur électrostatique

3.4.3 - Système de filtration dans un "by-pass"

Ce système de filtration dans un rameau ou "by-pass" a été retenu pour les tunnels de GRANFOSS (2300 m) et EKEBERG (1500 m).

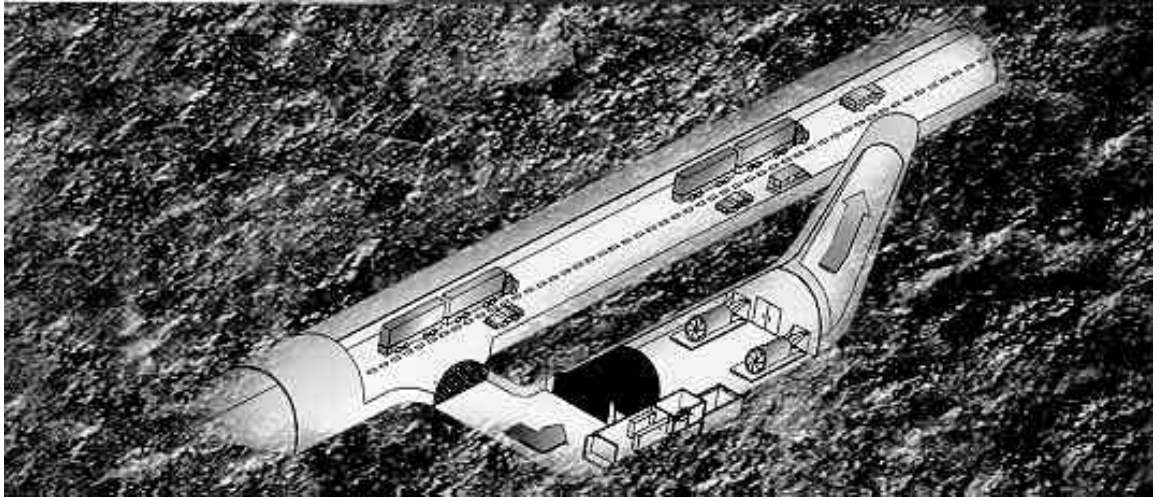


Figure 9 : Implantation de l'installation de filtration en "by-pass"

3.4.4 - Système de filtration au plafond

Dans le tunnel de HELL (3880 m), 3 stations équipées de précipitateurs électrostatiques, implantées en plafond, sont réparties sur la longueur de l'ouvrage.

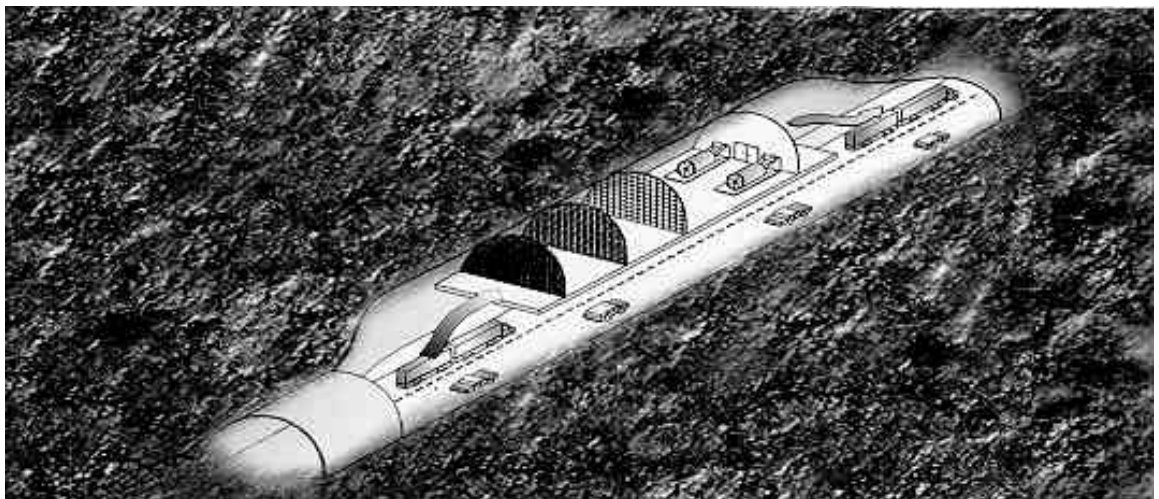


Figure 10 : Installation de filtration en plafond

4 - LE TRAITEMENT DES GAZ DES REJETS DES TUNNELS

On peut penser a priori que l'épuration de l'air des tunnels est facilement envisageable puisque le traitement de certains gaz toxiques est déjà réalisé à l'échelle industrielle, par exemple dans le cas de centrales thermiques et d'usines d'incinération des ordures ménagères.

En réalité, l'air rejeté par les tunnels présente trois spécificités par rapport à celui de ces installations :

- les débits d'air à traiter sont très importants (on peut donner comme ordre de grandeur $100 \text{ m}^3 / \text{s}$ par km de tunnel),
- les températures sont faibles (inférieures à 20°C) ce qui rend les réactions chimiques beaucoup plus lentes ou plus difficiles,
- les concentrations en polluants sont faibles.

4.1 - Les premières méthodes testées au Japon

Les premières approches de ce traitement des polluants gazeux rejetés par les tunnels, telles qu'elles étaient décrites dans un rapport publié au Congrès de l'AIPCR à Marrakech en 1991 avaient pour objectif principal l'élimination des NO_x . Après une étude préliminaire de plusieurs méthodes, quatre d'entre elles avaient été sélectionnées pour des examens plus approfondis ou des tests sur prototype.

Nous les citerons pour mémoire en donnant les principales orientations que nous connaissons mais sans rentrer dans le détail, car il semble qu'aucune d'entre elles n'ait donné lieu actuellement à une réalisation opérationnelle.

1 - EBA ("Electron Beam Ammonia") développée par Erbera Corporation.

Sous l'action du balayage par un faisceau d'électrons les molécules de O_2 et H_2O sont dissociées et les radicaux libérés réagissent avec NO , NO_2 et SO_2 .

2 - "Zeolite absorption method" développée par :
Hitachi Schipbuilding & Eng.

3 - et Mitsubichi Heavy Industries

L'air doit être au préalable filtré et séché (silicagel).

Le zéolite doit être régénéré par de l'air chaud saturé en NH_3 .

4 - "Activated carbon method" développée par Kobelco

Passage de l'air au travers de plusieurs couches de charbon actif régénéré périodiquement.

Le dénominateur commun de ces méthodes est d'annoncer des rendements de plus de 80 % pour NO_x. Mais le coût des installations nécessaires pour leur mise en oeuvre est très élevé, puisqu'il est estimé à environ 10 fois celui des précipitateurs électrostatiques

4.2 - Etudes effectuées en Allemagne pour le tunnel de l'Elbe à Hambourg

Lors du projet du 4ème tunnel sous l'Elbe à Hambourg, l'attention des autorités avait été attirée sur la nécessité de traiter les rejets d'air pollué et en particulier les NO_x. Une approche différente de celle testée au JAPON a été choisie en Allemagne : le recours à une méthode biologique.

Des essais en laboratoire ont été effectués et une installation pilote a été installée à une tête du tunnel en 1989. Cette première étude avait prouvé la faisabilité de l'oxydation biologique du NO par des bactéries. Des développements étaient à prévoir en particulier pour définir une technologie qui permette d'adapter cette méthode aux faibles concentrations mais aussi aux débits importants qui caractérisent les rejets de tunnel. Les conclusions étaient celles d'un rapport de 1991 cité dans la bibliographie.

Il semble que l'intérêt pour ce sujet ait été relancé plus récemment en Allemagne par un projet de recherche : "Biological Air Purification" en collaboration entre l'administration, l'université et l'industrie. Il est fait état de nouveaux résultats encourageants faisant appel à une technologie de membrane contenant des bactéries et qui serait applicable à des débits importants et au traitement de NO, SO₂ et NO₂.

Des essais en cours devraient permettre de conclure si cette méthode de traitement biologique peut devenir techniquement et économiquement applicable aux rejets des tunnels routiers. Les éléments d'information dont nous disposons actuellement concernent plutôt les difficultés rencontrées dues à la lenteur du processus et à la nécessité d'alimenter de manière continue les réactions.

4.3 - Essais effectués en Autriche

Une installation expérimentale a été mise en place il y a plusieurs années au Plabutsch Tunnel en Autriche. Elle avait pour but de vérifier le rendement de la filtration des poussières et des particules de suie par un précipitateur électrostatique, mais de plus de mettre au point des procédés d'épuration des gaz d'échappement émis en tunnel : CO, NO, NO₂, SO₂, C_xH_y.

La méthode par catalyse et la méthode biologique sont toujours en cours d'étude et les conclusions actuelles sont les suivantes :

"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 l'on peut obtenir une bonne efficacité d'élimination pour CO, NO₂, SO₂, C_xH_y. Le NO peut être éliminé par un convertisseur catalytique qui peut être régénéré très rapidement (5 minutes) en utilisant de l'hydrogène mais on constate que le convertisseur perd de plus en plus rapidement son efficacité

d'élimination du NO, pour une raison qui n'est pas encore connue. Le type actuel de pots catalytiques est très coûteux.

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 (efficacité de l'ordre de 30 %), 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 choses, 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".

4.4 - Etat des recherches en Norvège

Des recherches sur le traitement des gaz des rejets de tunnel ont débuté en Norvège en 1992, en collaboration entre l'administration et l'industrie.

Une installation pilote a été mise en place dans le tunnel d'Oslo.

Le schéma de cette installation est donné par la figure 11 : sa capacité est de 10 000 m³/h, soit 1/36 par rapport à la capacité de la ventilation du tunnel.

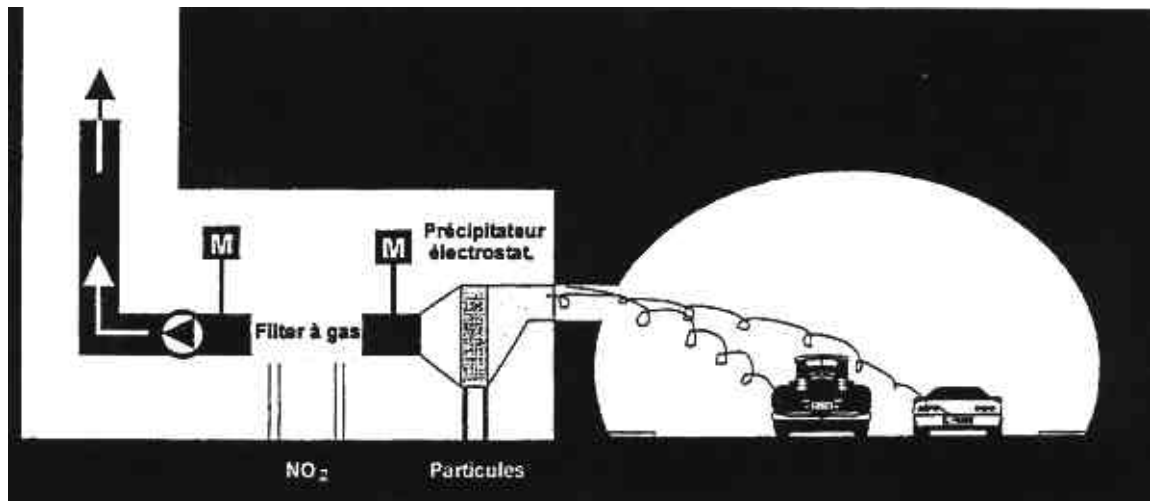


Figure 11 : Installation pilote dans le tunnel d'Oslo

Le principe du traitement est une réduction catalytique utilisant un type spécial de charbon actif. Une élimination préalable très efficace des particules est nécessaire. Le

rendement pour l'élimination du NO₂ est très élevé et constant (supérieur à 85 %). Par contre l'élimination du NO pose des problèmes le rendement passe de 90 % à 30 % en 1 mois puis à 15 % en 2 mois et à 5 % en 1 an. Pour conserver une bonne efficacité il faudrait donc réactiver la matière purifiante au bout d'un temps relativement court. Un autre procédé consiste à oxyder NO en NO₂ en utilisant un générateur d'ozone.

Les Norvégiens sont très optimistes et envisagent d'avoir recours à cette : "Selective Catalytic Reduction Technology" (SCRT) en utilisant un catalyseur carbone mis au point par la société ABB Environnement dans le cadre d'un contrat avec l'Administration Norvégienne des Routes. Ils font état d'un très bon rendement pour l'élimination du NO₂ (90 à 95%) mais aussi pour celle de certains composés organiques volatiles (dont le benzène). Différentes configurations sont envisagées pour favoriser le contact entre le gaz à traiter et le catalyseur mais chacune d'entre elles nécessite des volumes très importants. Le dimensionnement de l'installation s'appuie donc sur une définition précise de ses objectifs. La première application semble devoir être la ventilation du très long tunnel AURLAND-LAERDAL cité précédemment, pour lequel elle constituerait une solution plus avantageuse que le recours à un puits de ventilation intermédiaire.

5 - TRAITEMENTS ASSOCIES DES PARTICULES ET DES GAZ

Après avoir passé en revue les études et les réalisations concernant d'abord la filtration des particules solides et ensuite l'épuration des gaz contenus dans l'air des tunnels, il est logique et c'est bien une tendance actuelle, d'envisager d'associer ces deux types de traitement.

Suivant les objectifs prioritaires de ces réalisations, on peut distinguer deux types d'équipement :

- des installations très volumineuses, situées en sortie de tunnel et destinées à répondre à des contraintes d'environnement. Il s'agit de projets qui font l'objet d'études au JAPON et en ALLEMAGNE.
- des installations de dimensions réduites réparties en tunnel et destinées à résoudre des problèmes de pollution à l'intérieur de l'ouvrage. Il ne s'agit là, actuellement, que d'un concept étudié en particulier en Norvège, mais des réservations de places ont été prévues dans des installations récentes, pour associer ultérieurement des dispositifs d'épuration des gaz aux dispositifs de filtration existants.

5.1 - Etude en cours au Japon

Les résultats d'essais d'un système de dénitrification pour les rejets d'air d'un tunnel routier ont fait l'objet d'une publication au "8th International Symposium of Aerodynamics and Ventilation of Vehicles Tunnels 1994".

Le principe est le suivant : au départ on a environ 90 % de NO et 10 % de NO₂. Au cours du passage dans le précipitateur électrostatique destiné à éliminer les particules, une forte proportion de NO est oxydé en NO₂ soit sous l'effet de la décharge électrique, soit par réaction avec l'ozone. Les gaz sont ensuite humidifiés et amenés à traverser trois unités d'absorption de NO₂ constituées de gypse et de charbon actif en nid d'abeilles immergé dans de la potasse. Puis ils sont séchés.

Des essais ont été effectués sur la base d'un échantillon d'air vicié dont les caractéristiques moyennes étaient un débit de 2 m³/s et une concentration de 3 ppm de NO_x. Les résultats sur une année de mesures sont les suivants :

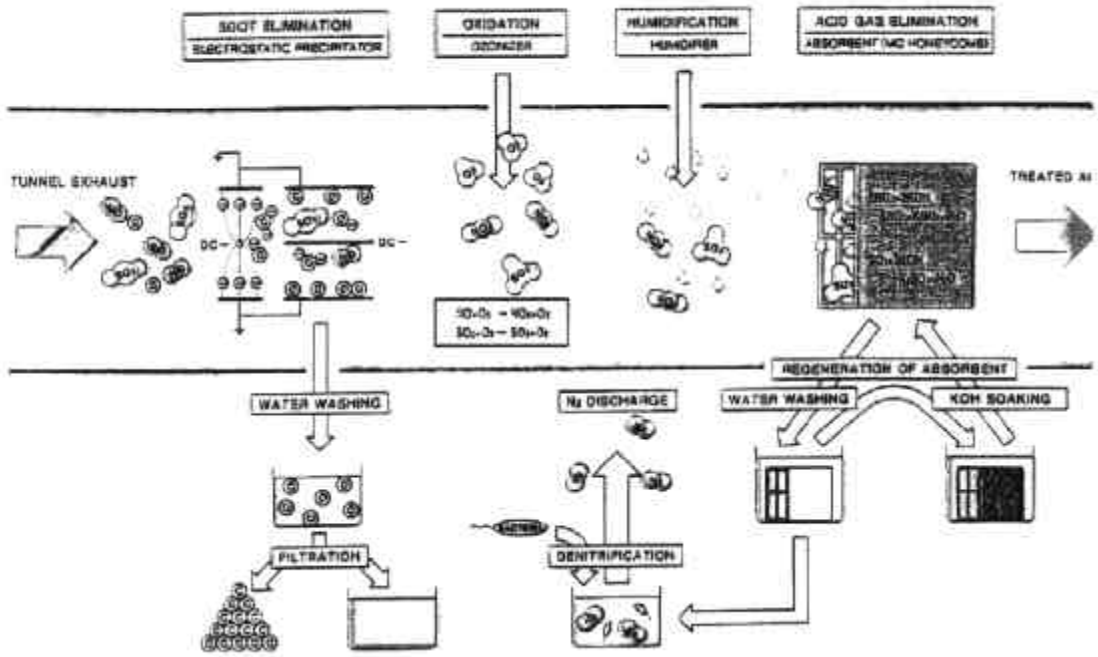
- le rendement de dénitrification est fonction du débit, il est de 80 % pour NO_x et 40 % pour NO₂ pour 2 m³/s et atteint 90 % pour NO_x et 80 % pour NO₂ pour 1 m³/s pour une même quantité d'absorbant ;
- le système peut travailler 150 h sans régénération, soit une autonomie d'environ 2 semaines à raison de 14 h par jour en moyenne ;
- l'adaptation du système de traitement à des variations rapides et importantes des concentrations en NO_x est satisfaisante ;

- les performances de l'ensemble du dispositif expérimental pour d'autres composants sont confirmées (suies # 90 %, SO₂ # 100 %) et il n'y a pas d'effet secondaire ;
- la consommation électrique est de l'ordre de 6,4 kW par m³/s (y compris les ventilateurs).

Le schéma de principe de l'installation ainsi que la réalisation pratique d'un tel dispositif pour un tunnel établis par National Panasonic Matsushita Electric Industrial CO - LTD font l'objet de la figure 12.

Il est à noter que le volume nécessaire à cette installation de traitement pour un volume de gaz traité de l'ordre de 420 m³/s correspond à celui d'un parallélépipède de : longueur 35 m, largeur 30 m, hauteur 7 m, sans compter la cheminée.

ELIMINATION PROCESS



ELIMINATION SYSTEM OF DIESEL SOOT & ACID GAS IN ROAD TUNNEL EXHAUST

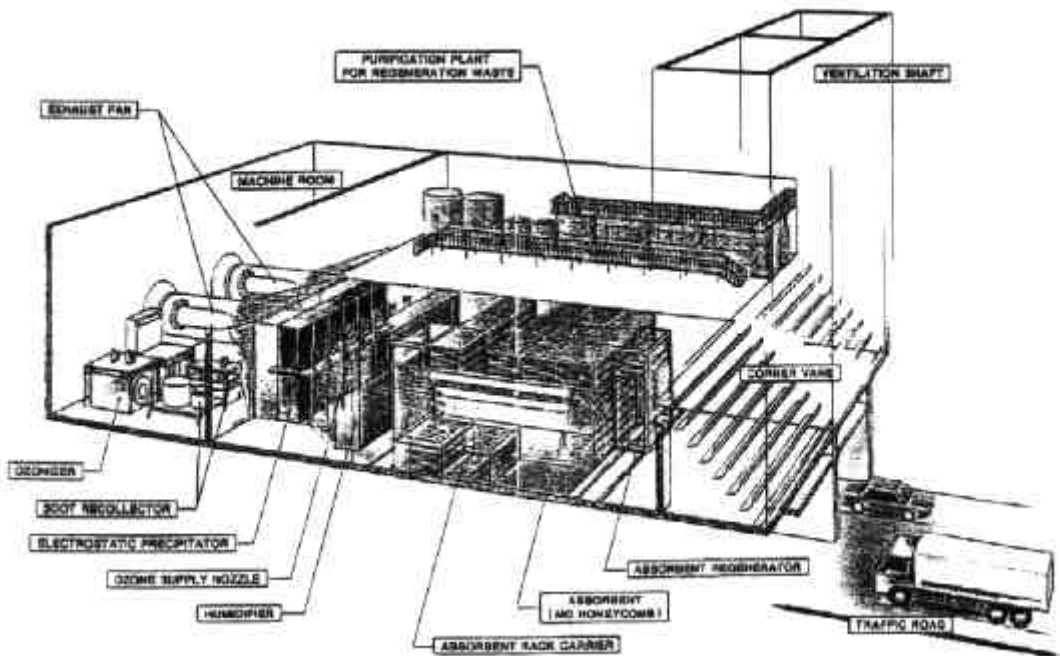
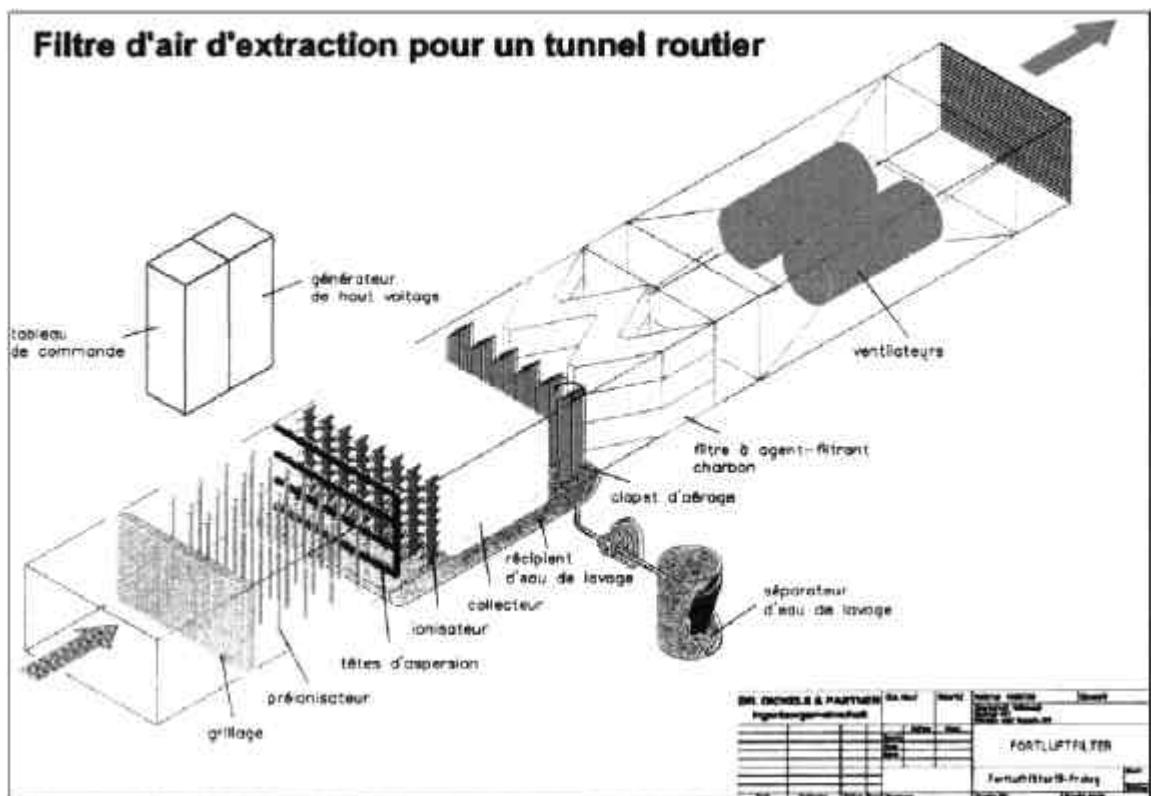


Figure 12 : Traitement des suies et des gaz - Principes et plan d'installation (Etude en cours au Japon)

5.2 - Résultats de recherche effectuée en Allemagne

Les résultats d'une étude effectuée à Hambourg par la société DICKELS & PARTNER ont fait l'objet d'une communication récente (octobre 1998). Elle concerne le système d'épuration de l'air "CLAIR" destiné à résoudre les problèmes d'environnement à proximité des rejets de tunnels : tête ou cheminée d'extraction, mais aussi des problèmes de ventilation pour des tunnels longs.

- Description :



Le schéma de principe présenté par la figure 13 extraite du document communiqué par la société qui étudie ce procédé met en évidence les différents étages de l'installation dont on peut ainsi préciser les rôles.

1 - Le grillage à mailles larges est destiné à arrêter les éléments les plus gros contenus dans l'air du tunnel.

2 - Le précipitateur électrostatique comprend deux étages :

- un préionisateur
- le séparateur proprement dit constitué d'un ionisateur et d'un collecteur

Si les collecteurs du précipitateur sont chargés de suies ou de poussières, une procédure de lavage par aspersion se déclenche et s'effectue automatiquement.

3 - Un filtre spécial à agent filtrant charbon permet d'éliminer avec un bon rendement le dioxyde d'azote, des hydrocarbures imbrûlés et du benzène.

Le NO qui représente une très forte proportion (90%) des NO_x dans l'air du tunnel est transformé en NO₂ à l'aide d'une électronique spéciale installée dans l'ionisateur du précipitateur électrique.

4 - Les éléments auxiliaires :

- le tableau de commande
- le générateur de haut voltage pour l'alimentation du précipitateur électrique
- le système de lavage, recueil et traitement des eaux usées
- les registres permettant d'isoler le filtre pendant la phase de lavage
- les ventilateurs

- Caractéristiques techniques :

- débit volumique d'air traité = 10 000 m³/h à 2 000 000 m³/h
- caractéristiques géométriques pour 100 m³/s
 - surface de filtration (section) = 20 m²
 - volume du filtre :
 - filtration des particules = 60 m³
 - épuration des gaz = 240 m³
- rendements :
 - suies = 85 %
 - NO_x = 60 %
 - HC = 90 %

5.3 - Unités de traitements associés envisagées en Norvège

Dans les tunnels norvégiens de Granfos et Ekeberg, les circuits de traitement de l'air implantés dans des by-pass ont été conçus de dimensions suffisantes pour permettre l'installation ultérieure éventuelle d'un système d'épuration des NO_x ; cette précaution a été prise en prévision d'un abaissement des valeurs limites de concentration en NO₂ admises en tunnel.(figure 14).

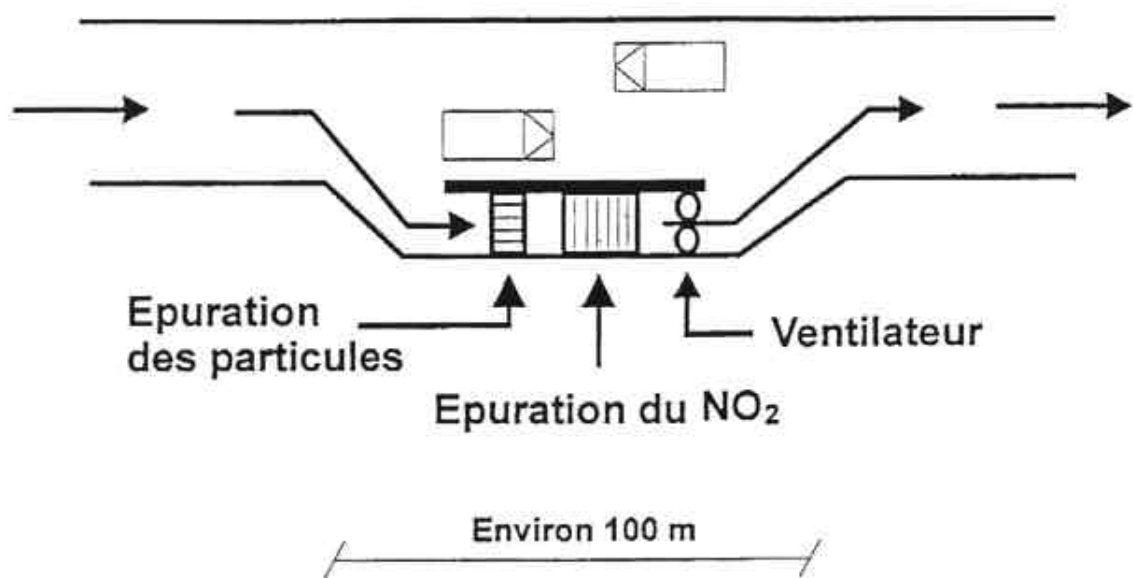


Figure 14 : Implantation en by-pass de traitements associés

Un autre exemple d'utilisation de ces traitements associés pour résoudre des problèmes de pollution interne, est le projet déjà cité précédemment d'un tunnel de 24 km de long en ventilation longitudinale, tunnel situé entre Aurland et Laerdal.

5.4 - Autre type de procédé de traitement étudié en France

D'autres types de solutions peuvent être envisagés pour assurer à la fois le traitement des particules solides et des gaz. Par exemple de les traiter simultanément.

L'application au problème des tunnels, d'un procédé industriel de laveur dans un électrofiltre est actuellement étudié en France. Il est conçu à l'origine pour assurer simultanément 3 fonctions : la filtration des poussières, le lavage des gaz toxiques et le dévésiculation.

Un pilote de laboratoire a été réalisé afin d'adapter certaines conditions de fonctionnement à la nature des gaz à traiter : tension électrique, débit et composition de la solution de lavage. Certains effets secondaires sont également envisagés, comme le risque de production de vapeur d'eau inhérent à toute méthode de lavage.

L'expérimentation n'en est qu'à ses débuts et plusieurs phases sont nécessaires avant de pouvoir juger si elle est techniquement et économiquement applicable pour le débit et la nature des polluants concernés.

6 - ETUDE DE CAS

Etude CETU sur la filtration d'un rejet de tunnel.

6.1 - Objectifs et orientations de l'étude

Consulté pour une étude du traitement de l'air d'un rejet de tunnel, destiné à répondre à des préoccupations d'environnement et plus particulièrement de dépôts de particules, le CETU a estimé en première analyse que l'impact du tunnel ne justifiait pas une telle mesure. La demande ayant néanmoins été confirmée, il a semblé intéressant de profiter de cette opportunité pour poursuivre la démarche selon trois orientations :

- des mesures in situ pour définir la nature de la pollution à traiter,
- un approfondissement des connaissances sur les études et les réalisations déjà effectuées et qui ont été évoquées précédemment,
- une consultation d'entreprises spécialisées dans le traitement de l'air à l'échelle industrielle ou dans la ventilation des tunnels.

6.2 - Enseignements généraux tirés de l'étude

Les enseignements et les propositions tirés de cette étude, ne sont sans doute pas généralisables à tous les cas de tunnel, mais ils constituent néanmoins une bonne base de définitions pour ce type de rejet.

- Les valeurs moyennes horaires des teneurs en particules en suspension mesurées en tunnel sont généralement inférieures à 1mg/m^3 et même $0,5\text{ mg/m}^3$. Le taux de dilution nécessaire pour atteindre les valeurs limites ($250\text{ }\mu\text{g/m}^3$ sur 24 heures) ou les objectifs de qualité (100 à $150\text{ }\mu\text{g/m}^3$ sur 24 heures et 40 à $60\text{ }\mu\text{g/m}^3$ sur 1 heure) définis par le décret du 6/05/98 relatif à l'environnement, est donc relativement faible.
- Les particules les plus grosses (poussières, résidus de dégradations mécaniques) sédimentent rapidement et la granulométrie des particules en suspension correspond principalement à des diamètres compris entre 1 et $5\text{ }\mu\text{m}$ voire submicroniques.
- Toutes les solutions de filtrations classiques ont été passées en revue : séparateurs mécaniques ou à inertie, média filtrants, laveurs, électrofiltres. La dimension des particules ainsi que les débits très importants à traiter (supérieurs à $300\text{ m}^3/\text{s}$) conduisent à retenir la solution du précipitateur électrostatique (EP).
- Il semble nécessaire d'associer deux méthodes ou deux niveaux de filtration ; soit un préfiltre qui protège le filtre électrostatique en arrêtant les particules les plus grosses, soit un laveur directement associé au filtre électrostatique et qui joue aussi un rôle dans la filtration.

- Il semble indispensable pour définir les caractéristiques et le rendement du filtre de passer par une phase de réalisation d'une installation pilote qui sera testée en situation réelle mais à débit restreint.

6.3 - Conception des installations proposées

Trois propositions plus ou moins détaillées et complètes ont pu être retenues à cette première étape de l'étude.

A - Une proposition est basée sur un principe de fonctionnement qui conjugue lavage et filtration électrostatique. Ce procédé a été conçu et mis au point par une société spécialisée. Il est utilisé dans le domaine industriel en particulier pour le traitement des rejets des incinérateurs.

La figure n°15 présente un schéma de principe du procédé et de l'installation. Les surfaces nécessaires pour assurer un bon rendement au traitement conduisent à la réalisation d'un caisson très volumineux.

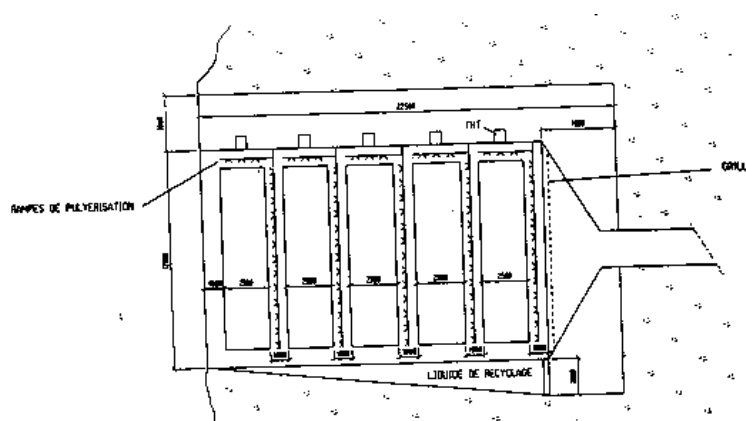


Figure 15 : Schéma de principe et de réalisation d'un laveur électrofiltre

B - Une proposition plus élaborée a été établie en collaboration par deux sociétés spécialisées dans le traitement de l'air et la ventilation des tunnels et qui possèdent déjà une expérience de telles réalisations dans des tunnels norvégiens.

La figure 16 présente un schéma de principe de l'installation complète telle qu'elle pourrait être réalisée dans la galerie d'air vicié du tunnel.

Les principaux éléments de cette installation sont :

- le préfiltre
- le filtre électrostatique
- le système de traitement automatique des eaux de lavage
- les ventilateurs d'extraction (avec leur silencieux)
- l'unité de contrôle

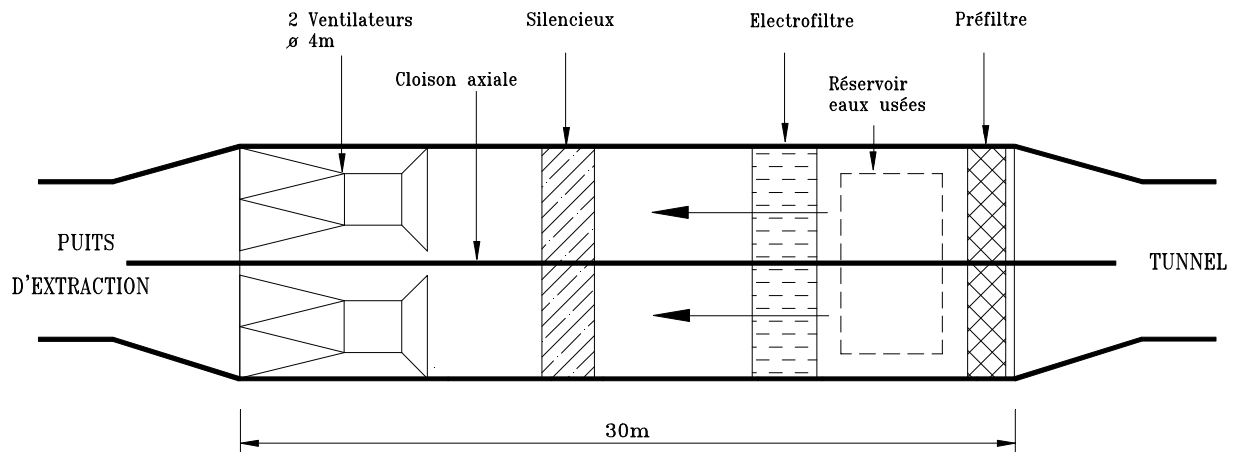


Figure 16 : Schéma de principe de l'installation de filtration implantée dans la galerie d'extraction

C - Une troisième proposition basée sur le même principe que la précédente est illustrée par la figure 17.

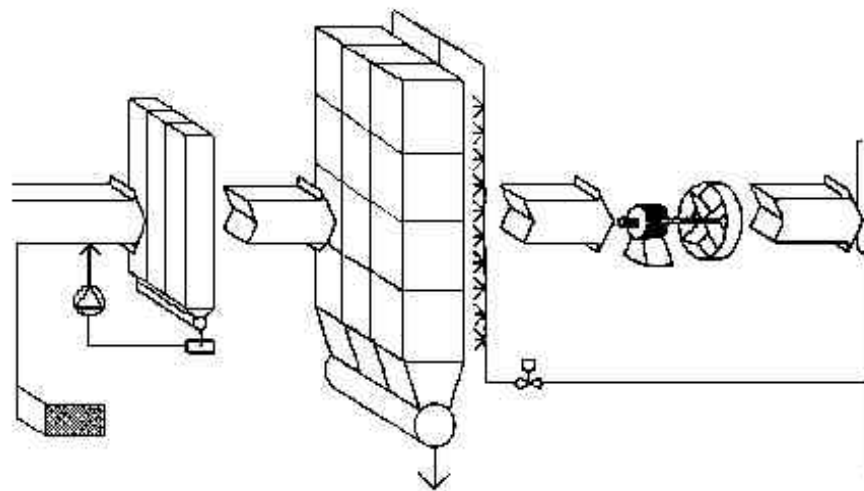


Figure 17 : Schéma de principe de l'installation de filtration

Elle comprend les mêmes éléments :

- un préfiltre : séparateur à inertie
- un précipitateur électrostatique
- un système de lavage du préfiltre et de traitement automatique des eaux
- un système d'extracteur
- une unité de commande

Elle atteste une bonne connaissance du problème de la part de cette société spécialisée dans la construction de filtres électrostatiques mais demanderait quelques compléments pour son adaptation en galerie.

6.4 - Données chiffrées correspondant à ces propositions

L'installation de filtration faisant l'objet de la consultation était définie par les données suivantes :

- débit maximal à filtrer : 350 m³/s
- teneur en particules fines : 0,5 à 1 mg/m³
- rendement de la filtration : 75 à 80%

A - Laveur-électrofiltre

(comprenant uniquement la fourniture de la partie filtration sans le caisson, ni les ventilateurs d'extraction)

- dimensions extérieures : 16 x 15 x 11 mètres
- puissance consommée : 300 kW
- coût estimatif : 16 700 kF

B - Préfiltre + Filtre électrostatique + Ventilation

(installation complète avec régénérateur du filtre et centrale de contrôle)

- surface du filtre électrostatique : 50 m²
- puissance consommée - filtration : 110 kW
- ventilation : 600 kW
- coût estimatif : 27 000 kF

C - Préfiltre + Electrofiltre

(sans la ventilation)

- surface du filtre électrostatique : 60 m²
- puissance consommée - filtration : 100 kW
- coût estimatif : 5 500 kF

6.5 - Coûts estimatifs

Ces coûts estimatifs correspondent à des fournitures et à des prestations très différentes (matériel, transport, installation, mise en service, interfaces et raccordements, unité de contrôle et automatisation). A titre indicatif on peut les comparer au coût d'investissement d'une unité de filtration d'un tunnel japonais : **28 000 kF** (prix 1992) - pour 210 m³/s - filtration + ventilation (hors génie civil). Mais il est toujours très difficile de savoir à quoi correspondent exactement les coûts d'investissement ou d'exploitation mentionnés.

7 - CONCLUSIONS

- **Le traitement de l'air des tunnels suscite un intérêt certain**

La recherche de la qualité de l'air et l'opportunité qu'offrent les ouvrages souterrains de réduire les nuisances dues au trafic automobile, justifient l'intérêt suscité par le traitement de l'air des tunnels.

Des études et même des installations opérationnelles ont été réalisées depuis de nombreuses années au Japon et plus récemment en Norvège. Des expérimentations sont également en cours dans d'autres pays comme l'Autriche, l'Allemagne et la France.

Les éléments qui viennent d'être présentés permettent de préciser les objectifs et de faire un bilan des connaissances actuelles concernant les procédés de traitement de l'air appliqués aux tunnels : leur principe, leur rendement et les moyens à mettre en oeuvre.

- **On doit distinguer deux types de traitement : la filtration des particules qui est bien maîtrisée et opérationnelle et le traitement des gaz qui est au niveau des recherches expérimentales**

La filtration des particules et des fumées qui constituent la pollution visible a été le premier objet du traitement de l'air des tunnels. Sur le plan technologique, il est acquis que l'utilisation de précipitateurs électrostatiques permet d'obtenir des résultats très satisfaisants en matière de filtration des poussières et des suies. Mais les équipements nécessaires demeurent volumineux et d'un coût élevé tant en investissement qu'en exploitation.

Pour le traitement des effluents gazeux, il n'existe pas actuellement de réalisation opérationnelle en tunnel. Des recherches expérimentales en cours donnent des résultats jugés encourageants. On distingue deux grandes orientations sur le plan des procédés que l'on peut désigner sous le nom de méthode catalytique et méthode biologique. Les études consacrées en particulier à la dénitrification des gaz ont donné certains résultats satisfaisants par leur rendement et leur stabilité mais elles ont également montré leurs limites. Il faut aussi considérer les contraintes induites et des effets secondaires qui pourraient s'avérer négatifs.

Une tendance nouvelle consiste à prévoir des équipements qui permettent d'associer les deux types de traitement. L'épuration des gaz nécessite d'ailleurs que l'air soit au préalable débarrassé des particules en suspension.

- **Le développement du traitement de l'air est orienté davantage vers des problèmes de ventilation (qualité de l'air en tunnel) que vers des préoccupations d'environnement (traitement des rejets).**

Le premier pays à s'intéresser au traitement de l'air des tunnels a été le Japon et les réalisations effectuées même à l'heure actuelle ont pour principal objectif le traitement des fumées. Cela s'explique par la présence dans ce pays d'un fort pourcentage de véhicules utilitaires légers à moteur diesel qui est à l'origine d'une diminution très sensible de la visibilité en tunnel, inacceptable pour les tunnels longs. Les stations de filtration jouent donc d'abord un rôle pour la ventilation de l'ouvrage et leurs effets sont bien sûr également bénéfiques pour l'environnement, puisqu'une partie de la pollution particulaire émise par les véhicules est éliminée en tunnel.

A Oslo par contre c'est d'abord un problème de rejet d'air en sortie de tunnel et donc une préoccupation d'environnement urbain qui a conduit à étudier la filtration de l'air évacué. Mais la justification des niveaux très élevés de pollution particulaire rencontrés est très spécifique à ce pays (pneus cloutés). Depuis les études effectuées en Norvège ont évolué vers une utilisation de ce procédé de traitement pour améliorer la qualité de l'air en tunnel et permettre d'étendre l'application de la ventilation longitudinale même à de très longs ouvrages, comme l'Aurland Laerdal Tunnel (24 km).

On doit également mentionner un nouvel aspect du traitement de l'air en tunnel qui semble pris en considération en Norvège, c'est le rôle positif que peuvent jouer les filtres électrostatiques en cas d'incendie, en réduisant les fumées pendant les 20 à 30 premières minutes (essais de l'Ekeberg Tunnel à Oslo).

Le traitement de certains gaz nocifs, en particulier les NO_x , répond à deux objectifs. Appliqué aux rejets, il peut contribuer à respecter les exigences en matière d'environnement, car les valeurs limites ou guides préconisées sont contraignantes pour la proximité immédiate des rejets de tunnel. Le traitement du NO_2 en tunnel peut aussi permettre de diminuer les débits de ventilation. En effet dans le cas d'une limitation sévère des niveaux admissibles de NO_2 en tunnel qui est actuellement envisagée, ce polluant pourrait devenir déterminant pour le dimensionnement ou l'exploitation de la ventilation de certains ouvrages.

Des problèmes de ventilation, surtout dans le cas de longs tunnels, peuvent conduire à préconiser des petites stations réparties dans l'ouvrage. Leur installation dans des by-pass exige d'importantes et coûteuses adaptations du génie civil. Il a alors semblé plus intéressant de les implanter en plafond plutôt que dans des by-pass, mais cette tendance pourrait être remise en cause pour des raisons d'exploitation.

- **Conclusion sur l'état actuel des connaissances et des applications du traitement de l'air pour résoudre les problèmes de qualité de l'air dans l'environnement des tunnels**

Le traitement de l'air des tunnels est un sujet difficile et les solutions opérationnelles satisfaisantes ne concernent que le domaine de la filtration. Les réalisations existantes et les études en cours apportent des éléments utiles pour la définition et le dimensionnement d'une installation ; mais on peut se demander si les teneurs en particules en suspension qui sont la plupart du temps relativement faibles en tunnel justifient de tels équipements.

Il subsiste encore des points à préciser avant de conclure que les objectifs du traitement sont correctement ciblés, que les méthodes retenues sont bien adaptées et globalement efficaces et que leur utilisation est économiquement acceptable. Dans l'état actuel des connaissances et des développements technologiques, cette solution du traitement de l'air des rejets ne devra être retenue (éventuellement sous forme de mesures conservatoires) que dans le cas où elle s'avère incontournable.

C'est donc la ventilation qui devra d'abord être étudiée pour résoudre les problèmes de qualité de l'air dans l'environnement des tunnels en faisant appel aux moyens adéquats, c'est-à-dire en jouant sur les débits et concentrations de l'air vicié rejeté ainsi que sur la localisation, la configuration des rejets et toute autre méthode de nature à améliorer la dispersion de la pollution pour protéger les points les plus sensibles.

Pour l'avenir on peut aussi compter sur l'évolution à la baisse des émissions de polluants des véhicules induite par la réglementation et par le renouvellement du parc pour diminuer "l'immission" des tunnels ; mais d'autre part les exigences sur la qualité de l'air ambiant risquent de devenir de plus en plus sévères.

Ces conclusions concernent le rôle du traitement de l'air pour résoudre des problèmes de pollution de proximité et d'environnement. Le rôle que ce traitement peut jouer dans la ventilation des tunnels est un autre sujet qui semble d'ailleurs de plus en plus souvent envisagé en particulier pour des tunnels longs. Mais les impératifs sont différents et il est nécessaire de recourir à des bilans comparatifs des coûts d'investissement et d'exploitation des équipements de traitement et des équipements de ventilation auxquels ils se substituent ou tout du moins qu'ils allègent.

J.P. MARSAULT

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Dossier Pilote des tunnels - Document Environnement - Centre d'Etudes des Tunnels - France - Décembre 1990
- 2 - Kan-Etsu Tunnel - Documentation Japan Highway Public Corporation - 1985 - "Un nouveau système de ventilation longitudinale utilisant un précipitateur électrostatique" - MM. BABA,OMASMI, NAKAMISHI, AKASHI
- 3 - L'expérience de l'utilisation des épurateurs d'air mécaniques et électrostatiques installés dans le tunnel d'Oslo en Norvège - K.O. BARGE, J.E. HENNING
Note communiquée au Comité des Tunnels Routiers de l'AIPCR - 1991
- 4 - Japanese proposal for removing NO_x from tunnel air - O. OHASHI, T. ISHIDAKA - TOKYO (Japan) - Contribution for PIARC Congress - Marrakech - 1991
- 5 - Exhaust fume purification in tunnels - K. PUCHER, R. PISCHINGER, G. SOLLMAN - University of technology - Graz (Austria) - Seminar OECD - Lugano - 1990
- 6 - Is there a technique for cleaning waste air from road tunnels ? - F. SCHRODER - Germany - Seminar OECD - Lugano - 1990
- 7 - Pollution dans l'environnement des tunnels routiers - J.P. MARSAULT - CETU - France - Génie Urbain - Décembre 1992
- 8 - Report on survey and research on tunnel ventilation design principles - Technology Center of Metropolitan Expressway - Japan - February 1993
- 9 - Technical note of Public Works Research Institute (Vol.61) - Ministry of Construction - Japan - September 1993
- 10 - Development of the ceiling type electrostatic precipitation system - SHOHO, NAKAMURA - Japan - Communication BHRG - 1994
- 11 - A field test of denitrification system for road tunnel - ATSUHI KATATANI - Japan - BHRG - 1994
- 12 - Elimination system of diesel soot and acid gaz in road tunnel exhaust - National Panasonic - Matsuhita Electric Industrial CO LTD - Japan - July 1994
- 13 - Results from research done in Norway to determine the possibility of cleaning polluted tunnel air - Soot / dust and gaz - Directorate of public roads - Norway - July 1994

- 14 - The cleaning of tunnel exhaust air from an Austrian point of view
Dr K. PUCHER- University of technology - Graz (Austria).
Vortrage world tunnel congress / STUVA - TAGUNG 95 in Stuttgart
- 15 - Rapport intercongrès du groupe de travail "Pollution - Ventilation" du Comité des tunnels routiers de l'AIPCR - Congrès du Montréal 1995
- 16 - Documents : International meeting for the European combined research project purification of exhaust polluted road air - Hamburg, Novembre 1995
- 17 - Purification processes for tunnel air -
K. PUCHER - Technical University - GRAZ (Austria)
BHRG 1997
- 18 - Ceiling mounted air filtration technology used for longitudinal ventilation -
H. ANDERL - CTA and J.E. HENNING - Norwegian Public Road -
BHRG 1997
- 19 - Testing of electrostatic precipitators on fire smoke absorption -
K. OPSTAD - Sintef Energy and J.E. HENNING -
Norwegian Directorate of Public Roads - BHRG 1997
- 20 - Denitrification system for road tunnel exhaust -
. KATANI - N. KITAGAWA - Y. MIMURA - M. ISHIDA - A. HASHIMOT -
Matsushita Co Ltd - BHRG 1997
- 21 - Etude du traitement des rejets d'air vicié d'un tunnel.
Rapports d'études CETU - Janvier et décembre 1997.
- 22 - Electrostatic precipitation systems - The road to a cleaner environment.
Plaquette CTA international AS - Clean Tunnel AIR (1997)
- 23 - Traitement de l'air de ventilation des tunnels routiers urbains. Nécessité ou fiction?
B. CHEZLEPRÊTRE et X. REICHENAUER - TEC Ingénierie -
Article dans la revue "Mines et Carrières - Industrie minérale" - Octobre 1997
- 24 - Epuration de l'air des tunnels routiers : CLAIR un nouveau système de filtration de l'air.
Communication DICKELS & PARTNER - Décembre 1998
- 25 - Epuration de l'air en association avec une ventilation longitudinale
J.E. HENNING - Administration norvégienne des routes publiques
Communication préparée pour le Congrès Mondial de la Route (AIPCR) de Kuala Lumpur (octobre 1999)