



Ministère
de l'Équipement,
des Transports
et du Logement

Direction
des routes



DEPOT DE POUSSIÈRES AU VOISINAGE DES TUNNELS ROUTIERS

M.C. GABET
Novembre 1999

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	3
2. PARTICULES ET TRAFIC ROUTIER	3
2.1. Evolution des émissions de particules	3
2.2. Origine et nature des particules	3
2.2.1. Emission des moteurs	3
2.2.2. Usure et corrosion	3
2.3. Formation des dépôts de poussières	3
3. METHODES D'EVALUATION DES DEPOTS ET D'ANALYSE DES PARTICULES	3
3.1. Recueil des poussières	3
3.2. Détermination de la masse des dépôts	3
3.3. Etude morphométrique, granulométrique et analyse des particules déposées	3
4. - DESCRIPTION DES EXPERIMENTATIONS	3
4.1. Tunnels testés	3
4.2. Implantation des points de mesures et masses des dépôts	3
4.2.1. Tunnel de la Croix-Rousse (1ère série de mesures)	3
4.2.2. Tunnel de Fourvière (2ème série de mesures)	3
5. RESULTATS DES MESURES	3
5.1. Résultats des mesures pondérales	3
5.2. Résultats des études morphométriques et granulométriques	3
5.3. Résultats de l'analyse qualitative élémentaire	3
6. - CARACTERISTIQUES DES EMPOUSSIEREMENTS	3
6.1. Masse de dépôts en fonction de leur position par rapport à la sortie du tunnel	3
6.2. Irrégularité des empoussierements dans le temps	3
6.3. Morphologie des particules	3

6.4. Granulométrie des particules	4
6.5. Composition des particules	4
7. COMPARAISON DES NIVEAUX CONSTATES AVEC D'AUTRES RESULTATS	4
7.1. Aspect réglementaire	4
7.2. Résultats de mesures effectuées sur d'autres sites	4
7.2.1. A l'intérieur des tunnels	4
7.2.2. A proximité des têtes de tunnels	4
7.2.3. Dans l'environnement	4
8. CONCLUSIONS	4
9. BIBLIOGRAPHIE	4
ANNEXE 1 Prise de clichés des échantillons	26
ANNEXE 2 Histogrammes de répartition des particules déposées	27

1. INTRODUCTION

Les aspects spécifiques de l'impact d'un tunnel routier, ont été analysés dans le document "Environnement" du Dossier Pilote des tunnels publié par le CETU en décembre 1990.

La qualité de l'air au voisinage des tunnels routiers est un élément de plus en plus important de la prise en compte de cet impact sur l'environnement, particulièrement en site urbanisé. Les rejets des tunnels par les portails ou les cheminées de ventilation constituent des sources de pollution ponctuelles qui s'ajoutent à une pollution de fond souvent non négligeable. Un certain nombre d'études ciblées, regroupées dans un thème de recherche, ont été entreprises afin de disposer d'éléments sur les différents aspects de la pollution. Celle qui fait l'objet du présent rapport est une étude expérimentale des dépôts de particules au voisinage des tunnels.

Les principaux polluants qui caractérisent la pollution d'origine automobile sont le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote, les hydrocarbures et les particules. Une forte proportion de celles-ci provient des émissions des véhicules à moteur diesel, voitures particulières, véhicules utilitaires légers et poids lourds et, surtout pour les plus fines, des effets nocifs ont été révélés par des enquêtes épidémiologiques. Les plus grosses particules, également imputables au trafic, sédimentent et constituent une pollution visible. Des enquêtes effectuées à proximité de voies à fort trafic montrent la sensibilité des riverains à cette nuisance.

Il existe peu de données chiffrées concernant les dépôts de particules liés au trafic routier. Le CETU a donc entrepris des mesures afin d'obtenir des ordres de grandeurs des quantités de poussières déposées à proximité des rejets de tunnel et aussi de les caractériser par l'analyse de leurs dimensions, leurs formes et leurs natures. Ces résultats comparés à ceux obtenus sur d'autres sites, ainsi qu'à certains aspects réglementaires, doivent permettre de fonder une appréciation sur "l'effet tunnel" pour ce type de pollution.

Cette démarche peut aussi être considérée comme le prolongement d'études précédentes. La première (1) effectuée par le CETU a permis d'estimer quantitativement la masse de poussières déposée sur les parois d'un ouvrage, à partir d'analyses d'échantillons d'eaux usées prélevés au cours de lavages de cinq tunnels de types différents. La seconde (2) effectuée à l'Institut National de Recherches sur les Transports et la Sécurité (INRETS) a consisté à mettre au point une méthode pour quantifier les dépôts de poussières susceptibles de salir les façades à proximité de voies routières.

Les constatations sur lesquelles s'appuient le présent document concernent le voisinage des rejets des têtes et puits de ventilation de deux tunnels urbains de Lyon : le tunnel de la Croix-Rousse et le tunnel de Fourvière. Dans chaque cas elles portent sur plusieurs mois de relevés.

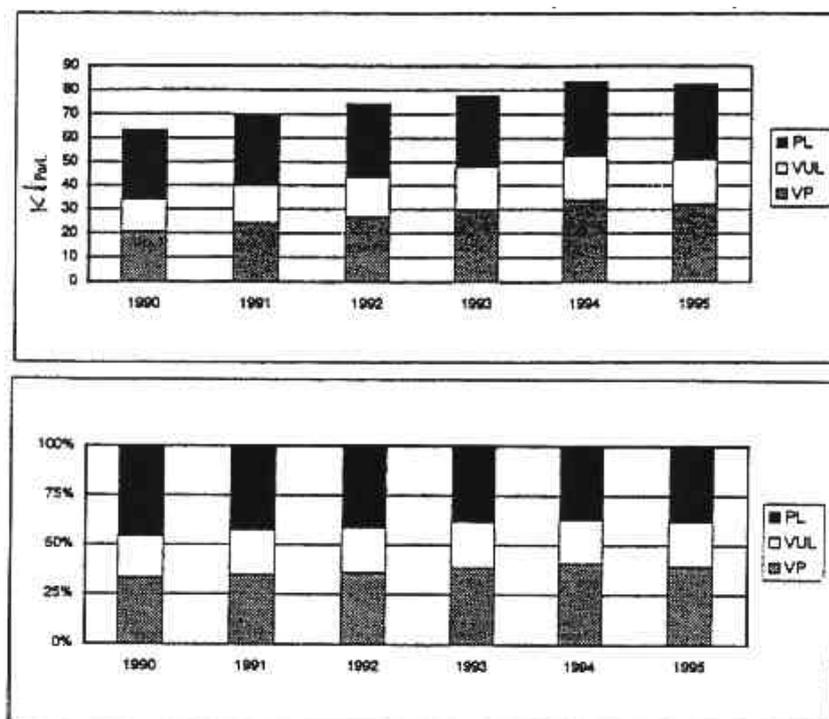
2. PARTICULES ET TRAFIC ROUTIER

Avant d'entrer dans la description des mesures effectuées et l'analyse des résultats, il semble souhaitable de rappeler quelques considérations générales sur les particules dues au trafic routier.

2.1. Evolution des émissions de particules

Les deux graphes suivants rassemblés dans la figure n°1 sont extraits d'une étude (3) du Centre Interprofessionnel Technique de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) mise à jour en 1997. Ils montrent l'évolution des émissions annuelles de particules dues au trafic en masse et en part par type de véhicule. Précisons qu'il ne s'agit ici que de particules émises par les moteurs.

Figure 1 :
Evolution des émissions de particules en masse et en part pour chaque type de véhicule.
(Source : CITEPA/CORALIE - Mise à jour 28/05/1997)



PL : Poids Lourds ; VUL : Véhicules Utilitaires Légers ; VP : Voitures Particulières

La croissance particulièrement importante en France de la proportion de voitures particulières à moteur diesel, a pour conséquence une progression régulière des émissions de particules dues au trafic routier. Une stabilisation et même une légère diminution peut néanmoins être constatée en 1995.

D'autre part, on peut noter qu'il y a pratiquement égalité entre la part due aux VP et celle due aux PL, avec environ 40 % à chacune ; une part plus faible, environ 20 %, est attribuée aux véhicules utilitaires légers.

2.2. Origine et nature des particules

Toutes les particules imputables au trafic routier ne proviennent pas des moteurs. On peut distinguer plusieurs sources qui peuvent correspondre à des tailles et à des compositions différentes :

2.2.1. Emission des moteurs

La combustion des moteurs à essence est à l'origine de particules constituées en majorité de fer et de carbone. La régression des émissions de plomb est significative et doit se poursuivre avec la disparition du plomb dans l'essence.

Les émissions dues à la combustion du gazole contiennent des particules qui se présentent sous la forme d'agglomérats de petites particules arrondies de carbone (résidus de combustion de taille variant entre 0,01 et 0,8 μm) sur lesquelles se trouvent adsorbés les hydrocarbures et autres espèces minérales de type sulfate, nitrate.

2.2.2. Usure et corrosion

Les autres principales sources de particules sont les dégradations des matériaux dues aux frottements et à la corrosion.

Usure de la chaussée

Les particules dues à l'usure de la chaussée par les pneus des véhicules contiennent principalement du silicium, du calcium, de l'aluminium, du fer, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (usure du bitume et des granulats plus ou moins enrobés).

Usure des pneumatiques

Elle produit des particules composées de : noir de carbone, calcium, soufre, zinc et hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Usure des garnitures de freins

Elle produit des particules qui contiennent du : cadmium, zinc et liants organiques.

Usure et corrosion des véhicules

L'usure et la corrosion des véhicules sont à l'origine de particules de fer, chrome, nickel, cuivre. Les processus sont accélérés en présence de sels de déverglaçage et d'humidité.

2.3. Formation des dépôts de poussières

Les particules qui se déposent au voisinage de la tête d'un tunnel sont le résultat de la pollution due aux rejets de l'air pollué sortant du tunnel et de la pollution due au trafic après la sortie de l'ouvrage.

A l'air libre les poussières évoluent de façons tout à fait différentes suivant leurs dimensions. Les fines particules diffusent et les plus grosses sédimentent. Les poussières qui sédimentent se fixent différemment suivant le type de surface ou de revêtement.

Les facteurs météorologiques : la force du vent, la pluie et l'humidité ont une influence sur l'uniformité des dépôts. Par temps sec, le vent peut entraîner plus loin les petites particules et la proportion des plus grosses particules augmente sur les dépôts à proximité des rejets. Par contre la pluie et l'humidité favorisent le colmatage des petites particules.

La température a une influence car la chaleur peut favoriser l'incrustation des salissures grasses. L'hiver, le salage des chaussées et l'utilisation des pneus cloutés augmentent la salissure.

La répartition de cette pollution particulaire est complexe et tous les phénomènes aléatoires dont elle dépend expliquent que les dépôts de poussières ne sont ni uniformes dans l'espace ni homogènes dans leur composition.

3. METHODES D'EVALUATION DES DEPOTS ET D'ANALYSE DES PARTICULES

3.1. Recueil des poussières

Les poussières sont recueillies sur des porte-échantillons répartis au voisinage de la tête du tunnel et fixés soit sur une façade soit sur un panneau de signalisation (ou même un arbre), généralement à une hauteur approximative de 1,50 m au dessus du sol. Les dépôts de poussières sont ainsi protégés de toutes les perturbations, des tourbillonnements de l'air et des dépôts accidentels de grosses particules.

Figure n°2 :
Plaque fixée sur un porte-échantillons



3.2. Détermination de la masse des dépôts

Des plaques d'aluminium anodisé placées 30 à 40 jours sur un même porte-échantillons sont pesées avant et après exposition et la masse des poussières déposées est exprimée en :

$$\text{g / m}^2 \text{ / 30 jours}$$

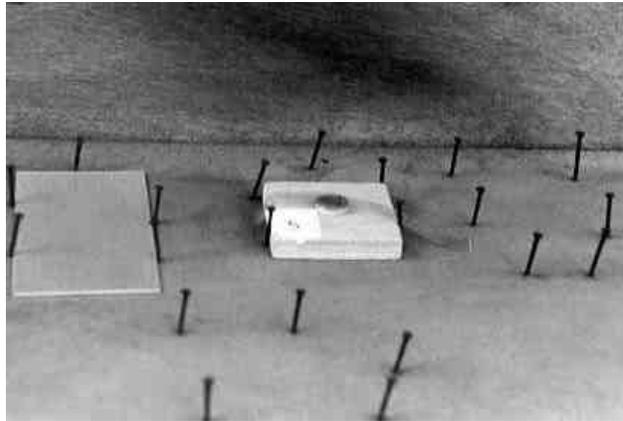
Ce procédé s'inspire de la méthode normalisée encore utilisée par certains réseaux de surveillance pour estimer l'influence d'une industrie sur son environnement.

3.3. Etude morphométrique, granulométrique et analyse des particules déposées

Les mesures de laboratoire ont été effectuées par l'Institut Pasteur de Lyon.

Les poussières à étudier doivent être recueillies par sédimentation sur des plaques-supports de Microscopie Electronique à Balayage (MEB).

**Figure n°3 :
Plaque métallique CETU
et plaque-support pour le microscope électronique**



On peut alors envisager divers niveaux d'observation et d'étude.

- **Une prise de cliché** permet de présenter les différentes formes de particules observées (voir annexe 1).
- **Une étude granulométrique et morphométrique :**

Un analyseur d'images BIOCROM relié directement au MEB permet la caractérisation dimensionnelle de la morphologie des poussières. Deux critères de cette caractérisation ont été retenus :

- **le diamètre équivalent**, qui représente le diamètre du cercle de la même surface que l'objet,
- **Le facteur forme, F**, qui est fonction de la surface S de la particule et dont la valeur est comprise entre 0 et 1. Plus F est proche de 1, plus l'objet est circulaire.

Des histogrammes de répartition des particules déposées ont été établis en fonction de chacun de ces deux critères (voir annexe 2).

- **Une analyse qualitative élémentaire :**

Le Microscope Electronique (MEB) est couplé à un spectromètre de rayons X. Les constituants des particules sont identifiés sur l'échantillon observé.

4. - DESCRIPTION DES EXPERIMENTATIONS

4.1. Tunnels testés

Les deux tunnels retenus sont des ouvrages en zone urbaine mais de types différents :

- le tunnel de la Croix-Rousse à Lyon,
- le tunnel de Fourvière, à Lyon.

Les caractéristiques de ces ouvrages sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 :
Principales caractéristiques des tunnels testés.

	Tunnel de la Croix-Rousse	Tunnel de Fourvière
Situation	Voie communale à Lyon	Liaison autoroutière entre A6 et A7 à Lyon
Longueur	1750 m	Tube nord : 1824 m Tube sud : 1819 m
Nb de tubes	1	2
Nb de voies / tube	4	2
Circulation	bidirectionnelle	unidirectionnelle
Déclivité	pas de rampe	Tube nord : rampe de 2,4 % sur 1407 m Tube sud : pente de 2,7 % sur 1008 m
Mode de ventilation	transversal	transversal
TMJA *	71568	83253

* *TMJA : trafic moyen journalier annuel pour l'année 1997*

4.2. Implantation des points de mesures et masses des dépôts

4.2.1. Tunnel de la Croix-Rousse (1ère série de mesures)

Au cours de l'année 1993, huit porte-échantillons ont été répartis au voisinage de la tête Rhône du tunnel de la Croix-Rousse.

Un neuvième point de prélèvement a été mis dans un parc de rase campagne, hors de toute pollution d'origine automobile et pendant la même période de mesures (il sert d'échantillon témoin).

La figure 4 donne une représentation de la tête du tunnel. Le tableau 2 précise la distance de chaque porte-échantillons par rapport à la section de sortie du tunnel et donne les masses moyennes des poussières sédimentées.

L'emplacement du porte-échantillon n° 7 n'a pas été choisi pour une estimation de pollution rejetée par le puits de l'air vicié, mais pour évaluer une pollution possible des habitations qui se trouvent à proximité. Ce puits d'extraction a un temps total de fonctionnement voisin de deux heures par semaine. En effet, contrairement à l'insufflation en air frais qui fonctionne pratiquement toute la journée dès la pointe de circulation du matin jusqu'à la fin de celle du soir, l'extraction de l'air vicié n'est déclenchée que rarement.

4.2.2. Tunnel de Fourvière (2ème série de mesures)

A la tête Gorge de Loup du tunnel de Fourvière neuf points de mesures (n° 10 à 19) ont été équipés au cours de l'année 1994.

Ils se trouvent répartis depuis le portail et jusqu'à une distance de 300 mètres depuis les sections d'entrée (du tube sud) ou de sortie (du tube nord) au bord de l'autoroute.

La figure 5 illustre la répartition de ces échantillons. Le tableau 3 précise les distances de chaque porte-échantillons par rapport au portail en précisant sa position et donne les masses moyennes de poussières sédimentées.

Certains porte-échantillons ont été mis à l'écart du trafic, près des arbres et au-dessus de la tête du tunnel (porte-échantillons n° 12) entre les deux usines de ventilation et près du puits d'extraction de l'air vicié. L'extraction ne fonctionne pratiquement que dans le tube nord et le temps de fonctionnement, sur une semaine, peut varier entre 20 et 50 heures en temps cumulé.

Un porte-échantillon n° 19 a été placé à une fenêtre d'immeuble d'une rue à grande circulation afin d'obtenir un ordre de grandeur de dépôts de poussières dus au trafic automobile en zone urbaine et sans l'influence d'un tunnel routier.

Figure n° 4 :

Tête Rhône du tunnel de la Croix-Rousse

**Mesure des dépôts de poussières
Implantation des porte-échantillons**

Valeur moyenne des masses de dépôts en chaque point sur toute la période de mesures

8 (3,7g/m²/30j)

3 (20g/m²/30j)

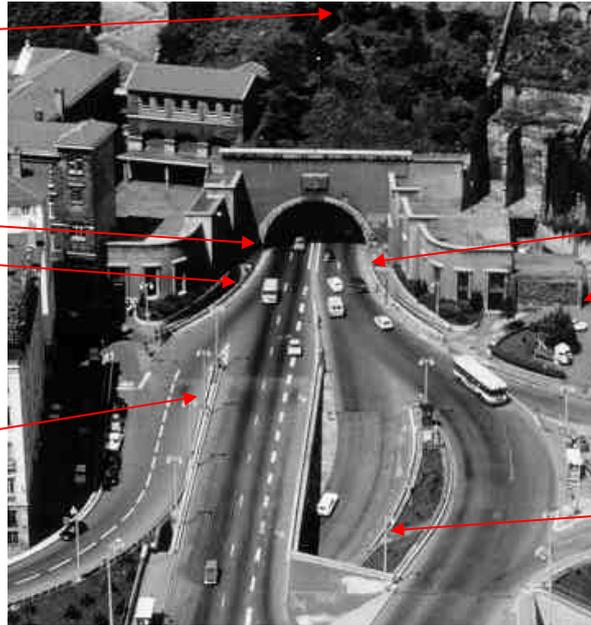
4 (13,6g/m²/30j)

5 (9,4 g/m²/30 j)

2 (11,3g/m²/30j)

1 (4,5g/m²/30j)

6 (5,5g/m²/30j)



**Mur de soutènement de
la bretelle de sortie
(Pont de Lattre de
Tassigny)
Porte-échantillons n°5**

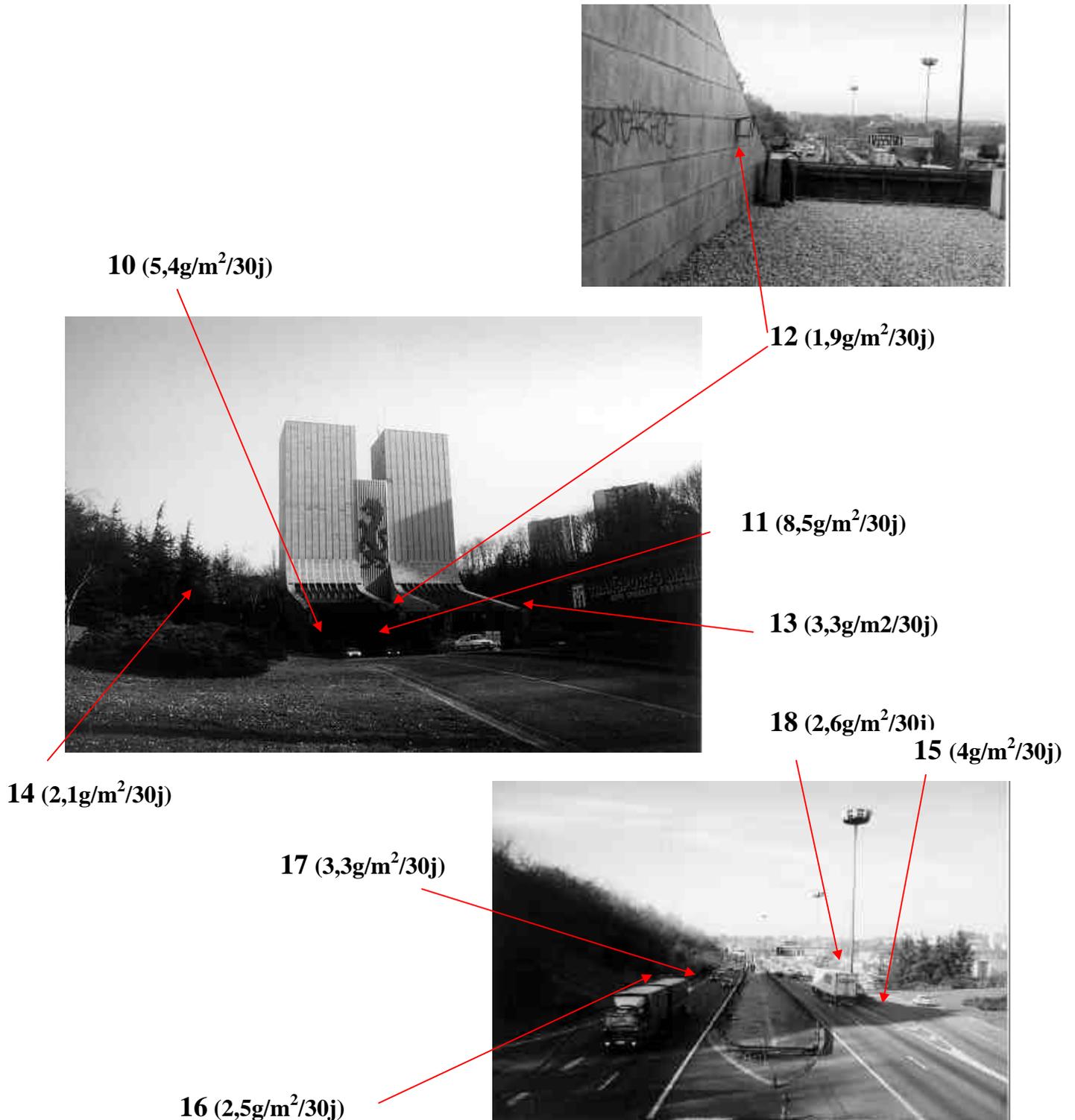


7 (1,4g/m²/30j)

Figure n° 5 :
Tête Gorge du Loup du tunnel de Fourvière

Mesure des dépôts de poussières
Implantation des porte-échantillons

Valeur moyenne des masses de dépôts en chaque point sur toute la période de mesures



5. RESULTATS DES MESURES

5.1. Résultats des mesures pondérales

Tableau 2 :

**Mesure des dépôts de poussières au voisinage du tunnel de la Croix-Rousse
(en g / m² / 30 jours)**

Implantation des points de mesures		masse moyenne des dépôts g / m ² / 30 jours (1)		
		Min	Max	Moyenne
Echantillon	Tunnel de la Croix-Rousse			
1	Sur cour, en retrait de l'axe du trafic, à 25 m de la sortie	3,3	6,8	4,5
2	Tête du tunnel, à 10 m, côté file d'entrée	10	13	11,3
3	Tête du tunnel, à 6 m, côté file de sortie	7,5	32	20
4	A 20 m de la sortie, côté file de sortie	7,5	26	13,3
5	Sur une bretelle de sortie	4	24	9,4
6	Sur une bretelle d'accès (100 m de la tête du tunnel)	3	8	5,5
7	Sur une terrasse au pied du puits d'extraction	1,2	1,5	1,4
8 (2)	Au dessus de la tête du tunnel (colline de la Croix-Rousse)	3,4	4	3,7
	En rase campagne			
9 (3)	Dans un parc fermé en l'absence de circulation automobile, à 6 m au dessus du sol, près d'un arbre			1,7

- (1) La masse de dépôts exprimée en g / m² / 30 jours est le résultat d'une exposition voisine de 40 jours donc sur deux mois consécutifs au cours de l'année 1993.
- (2) Le point n° 8 n'a fait l'objet de mesures que pour mars-avril-mai 1993 (problème d'accès sur le site).
- (3) Le point n° 9 a été testé les mois de juin, juillet et août 1993.

Tableau 3 :

**Mesure des dépôts de poussières au voisinage du tunnel de Fourvière
(en g / m² / 30 jours)**

Implantation des points de mesures		masse moyenne des dépôts g / m ² / 30 jours (1)		
		Min	Max	Moyenne
Echantillon	Tunnel de Fourvière			
10	A l'extrémité du tube nord, sur le piédroit nord	2,8	7,3	5,4
11	A l'extrémité du tube nord, sur le piédroit sud	3	12,6	8,5
12	Au dessus de la tête du tunnel, entre les deux usines de ventilation, à 6 m au-dessus du sol environ	1	2,4	1,9
13	Près de la section d'entrée du tube sud, derrière un panneau de signalisation	2	4,6	3,3
14	Dans un arbre, à 6 m de la section de sortie, décalé de 20 m à droite, par rapport à l'axe du trafic	1,1	2,7	2,1
15	A 90 m de la sortie du tube nord, à droite et au bord de l'autoroute Lyon-Paris	1	7,9	4
16	Dans un arbre à gauche de la sortie du tube nord, à 100 m de la tête du tunnel et à 10 m de l'axe du trafic	1,1	3,4	2,5
17	A 250 m de la sortie, au bord et à droite de l'autoroute Paris-Lyon	1,2	5	3,3
18	A 300 m de la sortie du tube nord, au bord et à droite de l'autoroute Lyon-Paris	0,8	6	2,6
	En ville			
19 (2)	Au 3ème étage d'une rue à grande circulation			2,8

- (1) Les masses des dépôts exprimées en g / m² / 30 jours sont établies sur une période de l'ordre de 40 jours au cours de l'année 1994.
- (2) Pour le porte-échantillon n° 19 un seul résultat est disponible correspondant à une exposition de 50 jours.

5.2. Résultats des études morphométriques et granulométriques

Les photos n° 3 à 11 représentant des échantillons observés au microscope électronique, à divers grossissements, sont mises en annexe 1.

En annexe 2 sont donnés les histogrammes de répartition granulométrique des particules déposées suivant le facteur forme et suivant le diamètre équivalent.

Le numéro caractérisant l'échantillon et son emplacement est le même que celui qui est utilisé pour les mesures pondérales. Chaque échantillon est observé sur un même nombre de champs dont chacun représente la surface d'observation de l'analyseur BIOCOM.

En fixant un même nombre de champs pour tous les échantillons il est possible de mieux comparer l'empoussièrement des dépôts qui sont observés sur des surfaces identiques.

L'étude morphométrique et granulométrique des dépôts a été effectuée pour les échantillons :

- n° 1 à 7 du tunnel de la Croix-Rousse : tableau 4
- n° 12, 15 et 18 du tunnel de Fourvière : tableau 5

Tableau 4 :

**Tête Saône du tunnel de la Croix-Rousse.
Tableau récapitulatif du nombre de poussières observées
de leur forme et de leur dimension sur 7 échantillons.**

Echantillon	Nombre de particules	Diamètre équivalent				Facteur Forme		
		Moyen	Minimum	Maximum	Médiane	Moyen	Minimum	Maximum
1	851	12,96	1,2	103,91	7,21	0,59	0,08	0,98
2	1897	11,23	1,36	86,07	10,87	0,549	0,16	0,93
3	2408	12,78	1,36	146,18	10,87	0,55	0,11	0,92
4	2418	11,87	1,37	149,76	10,94	0,557	0,04	0,93
5	957	12,27	1,35	132,12	5,06	0,57	0,08	0,91
6	666	10,57	1,56	104,07	5,17	0,58	0,14	0,94
7	817	3,99	0,78	52,12	2,15	0,56	0,12	0,96

Tableau 5 :

**Tête Gorge de Loup du tunnel de Fourvière.
Tableau récapitulatif du nombre de poussières observées
de leur forme et de leur dimension pour 3 échantillons.**

Echantillon	Nombre de particules	Diamètre équivalent				Facteur Forme		
		Moyen	Minimum	Maximum	Médiane	Moyen	Minimum	Maximum
12	1093	18,32	4,01	140,91	13,3	0,58	0,04	0,9
15	2015	29,50	5,83	163,4	23,5	0,53	0,05	0,89
18	3771	29,87	3,82	557,46	22,93	0,56	0,07	0,9

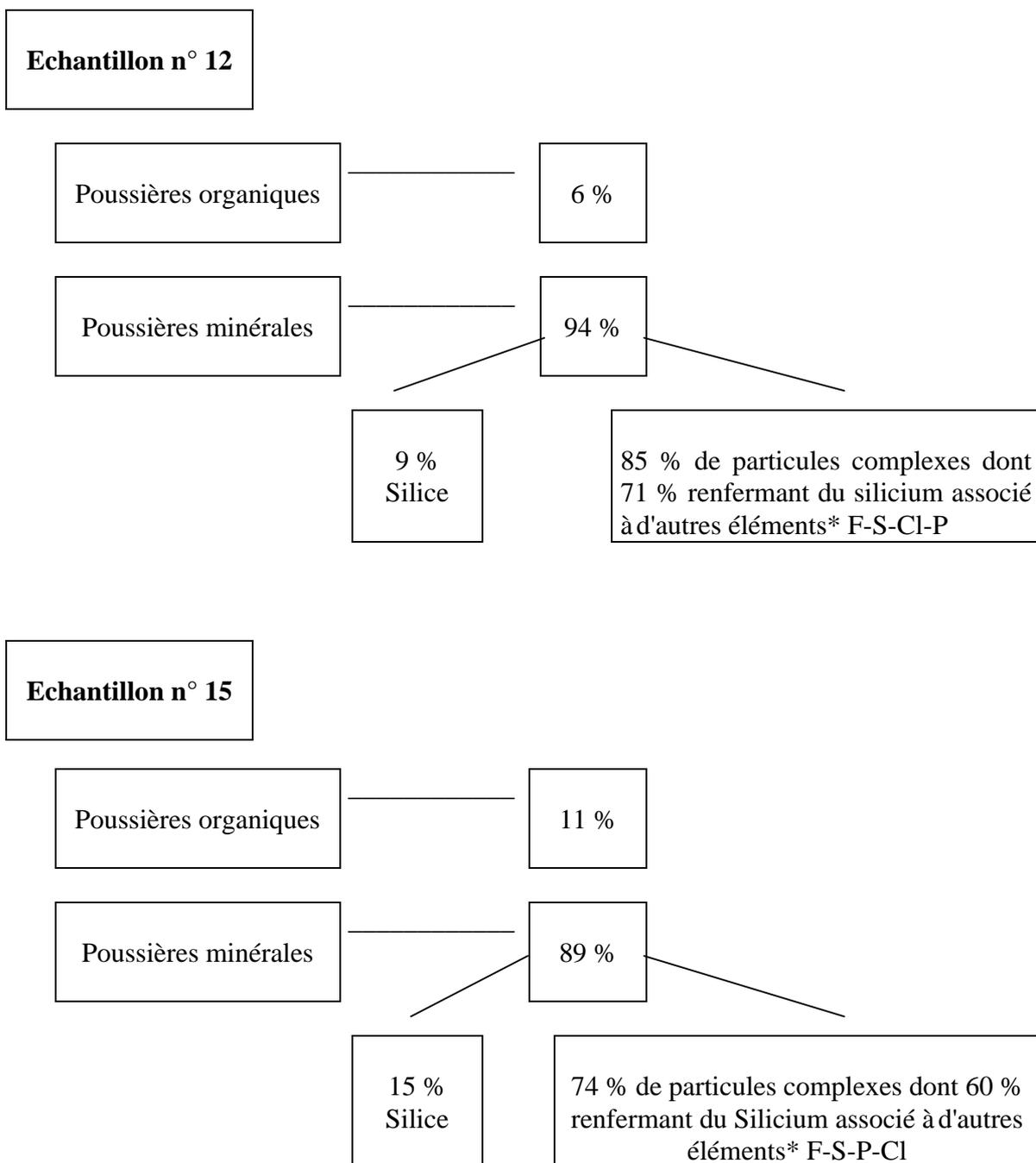
5.3. Résultats de l'analyse qualitative élémentaire

L'analyse qualitative élémentaire des particules a porté sur deux échantillons prélevés aux points n° 12 et 15 relatifs au tunnel sous Fourvière.

Le tableau 6 donne les principales différences de composition des poussières pour ces prélèvements.

Tableau 6 :

Composition des poussières



* Sous forme de Silicates - Carbonates - Sulfates - Oxydes de Na - Ca - K - Al - Mg - Fe - Ba - Mn - Pb

6. - CARACTERISTIQUES DES EMPOUSSIEREMENTS

6.1. Masse de dépôts en fonction de leur position par rapport à la sortie du tunnel

- En sortie de tunnels:

Les niveaux d'empoussièrement sont relativement élevés près des sorties des deux tunnels et particulièrement à la tête Rhône du tunnel de la Croix-Rousse où les valeurs moyennes des dépôts atteignent $20 \text{ g} / \text{m}^2 / 30 \text{ jours}$. A 80 et 100 mètres de la tête de ce dernier on trouve respectivement $9,4 \text{ g}$ et $5,5 \text{ g} / \text{m}^2 / 30 \text{ jours}$.

Au voisinage de la tête du tunnel de Fourvière, au niveau de la sortie du tube nord, les valeurs moyennes des dépôts sont un peu plus faibles car elles ne dépassent pas $8,5 \text{ g} / \text{m}^2 / 30 \text{ jours}$.

- Au pied des puits de ventilation:

Le point n° 7, qui est situé au pied du puits d'extraction du tunnel de la Croix-Rousse, est le moins pollué de tous les points testés sur l'ensemble de toutes les mesures.

Le point n° 12, au pied du puits d'extraction du tunnel de Fourvière, a une pollution légèrement supérieure à celle du point n° 7. Il est en effet à 6 m au dessus de la chaussée et l'influence du trafic n'est pas négligeable.

- Dans une rue à trafic important:

La fenêtre d'une façade d'immeuble dans une rue très circulée (point n° 19) est plus polluée que la proximité des rejets de l'air vicié ($2,8 \text{ g} / \text{m}^2 / 30 \text{ jours}$) et a une pollution voisine de celle que l'on trouve à 300 m de la sortie du tunnel de Fourvière (point n° 18).

- En rase campagne:

Les dépôts obtenus en zone rurale, représentée par le point n° 9 en l'absence de toute pollution d'origine automobile ($1,7 \text{ g} / \text{m}^2 / 30 \text{ jours}$) ou dans les arbres à proximité du tunnel de Fourvière (entre 2 et $2,5 \text{ g} / \text{m}^2 / 30 \text{ jours}$) correspondant à une salissure résultant de "la pollution naturelle". Le laboratoire des Monuments Historiques fait d'ailleurs une distinction entre les salissures "chimiques" en milieu urbain et les salissures "biologiques" en milieu rural.

6.2. Irrégularité des empoussièrement dans le temps

Les valeurs moyennes des masses des dépôts sur l'ensemble des périodes de mesures peuvent varier dans un rapport de 1 à plus de 7 (points n° 15 et 18). Les fluctuations diminuent avec l'éloignement par rapport au trafic et à la tête du tunnel (point n° 7). Près de la tête du tunnel et du trafic (point n° 2) on constate une pollution assez constante, dans un rapport de 1 à 1,3.

Ces irrégularités de dépôts sont le résultat du passage des véhicules et de tous les phénomènes aléatoires susceptibles d'intervenir : averses, orages, l'état du sol et éventuellement de travaux ou activités qui peuvent se dérouler à proximité des ouvrages.

Au cours de l'année 1993, au point n° 3, une modification de l'état du sol (présence de plantations) autour du porte-échantillons a entraîné une diminution des masses de dépôts de particules sur les plaques.

6.3. Morphologie des particules

Les prises de clichés (photo 3 à 11) et les histogrammes de répartition du nombre de particules par classe du facteur forme montrent la forme très irrégulière des poussières.

Les histogrammes relatifs aux points n° 2, 3 et 4 montrent une similitude du nombre de particules par classe de forme et en particulier pour $F \approx 0,5$. Ces points sont assez proches et l'explication que l'on peut envisager est qu'il existe une similitude de provenance de ces dernières : dégradation de la chaussée. Celles-ci étant généralement de forme plus irrégulière que celles qui correspondent à des résidus de combustion généralement plus sphériques.

6.4. Granulométrie des particules

Les particules déposées près du tunnel de la Croix-Rousse ont un diamètre équivalent moyen moins élevé (10 à 12 μm) que celles qui sont disposées près du tunnel de Fourvière, au bord de l'autoroute (29 μm) et même au dessus du trafic (18 μm).

Les dimensions des particules ont tendance à diminuer lorsque la distance du point de prélèvement par rapport à l'axe de trafic croît. Les dépôts proches des cheminées de ventilation en sont des exemples (points n° 7 et 12).

Les tourbillonnements d'air engendrés par la vitesse des véhicules peuvent contribuer à remettre les particules les plus fines en suspension et donc à diminuer leur proportion dans les dépôts de proximité.

6.5. Composition des particules

Les analyses comparatives de la composition des poussières portent seulement sur deux échantillons. Le point n° 12 est au dessus de la chaussée, au niveau de la sortie du tunnel de Fourvière. Le point n° 15 est à 100 m de la sortie, au bord de l'autoroute.

Dans les deux cas la proportion de poussières d'origine minérale est prépondérante bien qu'elle soit un peu moins élevée pour le dépôt de l'échantillon situé sur le bord de l'autoroute.

La silice et les particules complexes renfermant du silicium proviennent essentiellement de l'usure de la chaussée. Ceci est en accord avec les données recueillies dans la littérature et les résultats de mesures faites sur des particules déposées dans les tunnels et entraînées notamment au cours de lavages (1).

Les particules organiques provenant des gaz d'échappement ainsi que de l'usure des chaussées sont en plus grande proportion dans l'échantillon qui est le plus près de la chaussée.

7. COMPARAISON DES NIVEAUX CONSTATES AVEC D'AUTRES RESULTATS

7.1. Aspect réglementaire

Les dépôts de particules à proximité des voies à forte circulation sont considérés comme une nuisance due au trafic routier mais il n'a pas été établi de corrélation avec les effets sur la santé des riverains. Il n'existe pas de valeurs limites fixées par une réglementation européenne ou française du type de celles qui concernent les particules fines en suspension. Néanmoins quelques pays ont fixé des valeurs limites admissibles pour l'environnement :

La Suisse : $200 \text{ mg/m}^2/\text{jour} = 6 \text{ g/m}^2/30 \text{ jours}$
L'Allemagne : $350 \text{ mg/m}^2/\text{jour} = 10,5 \text{ g/m}^2/30 \text{ jours}$

Dans cet ordre d'idée on peut également mentionner la valeur seuil proposée pour différencier une zone dite faiblement polluée d'une zone fortement polluée par la norme française NF x 43007 (4) concernant les mesures de "retombées" par la méthode des plaquettes de "dépôts".

NF x 43007 : $1000 \text{ mg/m}^2/\text{jour} = 30 \text{ g/m}^2/30 \text{ jours}$

Des niveaux de l'ordre de $500 \text{ mg/m}^2/\text{jour}$ correspondent déjà à une gêne potentielle importante et des niveaux supérieurs à $1000 \text{ mg/m}^2/\text{jour}$ peuvent se rencontrer à proximité de certaines carrières ou sites industriels.

7.2. Résultats de mesures effectuées sur d'autres sites

7.2.1. A l'intérieur des tunnels

Des mesures effectuées à l'intérieur des tunnels testés on permis d'obtenir les résultats suivants :

- Tunnel de Fourvière
(dans le tube nord, en by-pass à 2m de l'axe du trafic) :
 $5 \text{ à } 10 \text{ g/m}^2/30 \text{ jours}$
- Tunnel de la Croix-Rousse
(échantillons fixés sur les parois)
 $15 \text{ à } 27 \text{ g/m}^2/30 \text{ jours}$

On constate donc des empoussièrtements différents selon la proximité du trafic, le tunnel et la période de mesure ; les dépôts les plus importants étant constatés pendant les périodes hivernales.

7.2.2. A proximité des têtes de tunnels

Deux stands placés simultanément en février 1991 aux deux têtes de tunnel de Fourvière et de la Croix-Rousse, avaient permis d'obtenir les résultats suivants :

- Tunnel de Fourvière
(à la tête Saône, entre les deux tubes)
21 g/m²/30 jours
- Tunnel de la Croix-Rousse
(à la tête Rhône, à droite de l'entrée)
14 g/m²/30 jours

7.2.3. Dans l'environnement

On trouve quelques valeurs chiffrées dans des rapports d'études mais il manque généralement des précisions concernant l'implantation des échantillons et de la méthode de mesure.

A Paris : en hiver : 8,4 g/m²/30 jours
 en été : 2,1 g/m²/30 jours

A Reims : 1,8 à 2,4 g/m²/30 jours

A Fribourg en Suisse : 2 à 3,5 g/m²/30 jours

Ces différentes valeurs sont représentatives d'une pollution moyenne urbaine.

On peut à titre comparatif mentionner des mesures en milieu rural qui ont donné des valeurs de l'ordre de 2 g/m²/30 jours ; soit donc très voisines des valeurs obtenues en milieu urbain, mais la méthode de mesure était différente et vraisemblablement également la nature des particules composant les dépôts.

8. CONCLUSIONS

L'objectif de cette étude était d'obtenir des éléments d'information sur les dépôts de particules au voisinage des tunnels afin de définir l'effet tunnel et la zone d'influence des rejets pour ce type de nuisance. Des analyses de laboratoire ont de plus permis de préciser la nature des particules.

La méthode utilisée prend surtout en compte les poussières les plus grosses qui sédimentent rapidement ; les plus fines provenant prioritairement des émissions des moteurs restent davantage en suspension et peuvent être entraînées plus loin, en fonction de la vitesse de l'air.

Les mesures effectuées à la tête du tunnel de Fourvière mettent en évidence une décroissance rapide des dépôts lorsque l'on s'éloigne de la tête du tunnel et de l'axe du trafic. Ses échantillons placés à 300 m du portail au bord de l'autoroute traduisent la pollution normalement rencontrée à proximité d'une voie à forte circulation. Au voisinage de la tête du tunnel de la Croix-Rousse les niveaux restent plus élevés mais on se trouve dans une zone urbanisée où la pollution de fond est plus importante.

On peut tirer les conclusions suivantes :

- d'abord il est difficile de définir la zone d'influence d'un rejet de tunnel par rapport à la pollution due au trafic extérieur. C'est une constatation générale des mesures in situ concernant la dispersion de la pollution quelle que soit sa nature : gazeuse, particules en suspension ou dépôts.
- dans le cas des dépôts, la méthode de mesure, la localisation précise des échantillonnages et les conditions extérieures (vent, hygrométrie) jouent un rôle déterminant.
- cependant si l'on compare aux niveaux de pollution relevés en site urbain ou à proximité de voies à forte circulation, la zone d'influence d'un rejet de tunnel en ce qui concerne la pollution particulaire est très limitée, ne dépassant pas quelques centaines de mètres.

9. BIBLIOGRAPHIE

- (1) M. C. GABET (CETU) - Pollution des eaux de lavage des tunnels routiers - Revue Générale des Routes.
N° 687 - Juillet - Août 1991
- (2) M. N. TERRAT - Approche méthodologique de la mesure de la salissure en milieu urbain en fonction du trafic automobile : application aux revêtements de façades.
Thèses de doctorat du Génie de l'Environnement, Avril 1988, université de Savoie.
- (3) Q.C. DANG & J.P.FONTELLE Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA)
Emissions atmosphériques dues aux transports en France - Période 1990 - 1995 - Réflexions et perspectives.

Etudes documentaires n°126
- (4) Norme NF : NFX 43007 - Mesures de "retombées" par la méthode des plaquettes de "dépôts"
- (5) CETU - Dépôts de poussières au voisinage des têtes de tunnels - Rapport sur les mesures effectuées au tunnel de la Croix-Rousse de 1991 à 1993.
M. C. GABET - Novembre 1994.
- (6) J. M. COE and STEVEN E. LINDBERG - The morphology and size distribution of atmospheric particles deposited on foliage and inert surfaces. Technical papers Mars 1987 - Volume 37 n° 3.
- (7) Institut Pasteur - Département d'Hygiène Appliquée à l'Homme et à son Environnement.
Unité d'Aérocontamination - Résultats de mesures

ANNEXE 1

Prises de clichés

Tunnel Croix Rousse :

Echantillon n° 1 :	Photo 1	33X
	Photo 2	133X

Echantillon n° 2 :	Photo 3	31X
--------------------	---------	-----

Echantillon n° 6 :	Photo 4	31X
	Photo 5	130X

Tunnel de Fourvière :

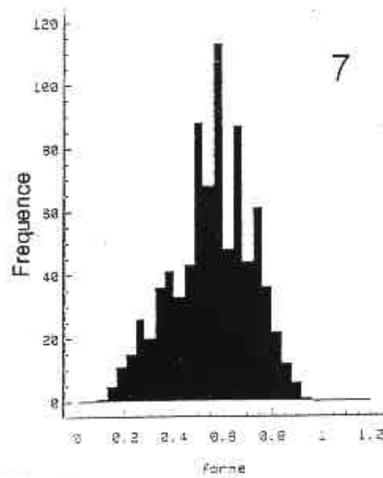
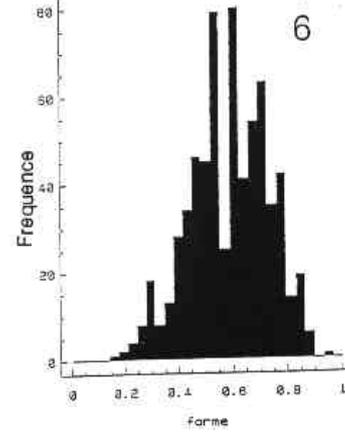
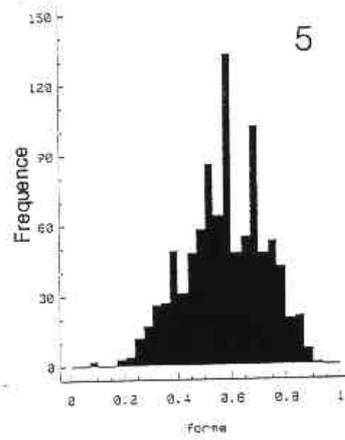
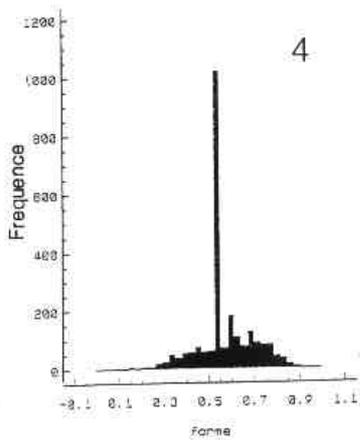
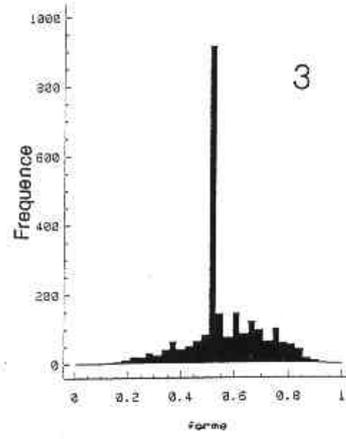
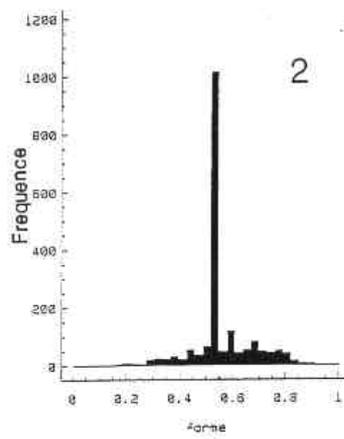
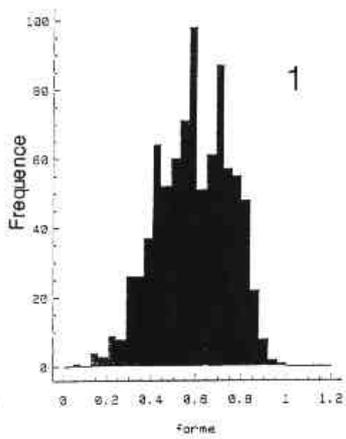
Echantillon n° 15	Photo 6	56X
	Photo 7	113X

Echantillon n° 18 :	Photo 8	54X
	Photo 9	320X

Cette planche représente pour les échantillons n° 1, 6, 15 et 18, une vue générale et une vue plus détaillée de chacun des dépôts.

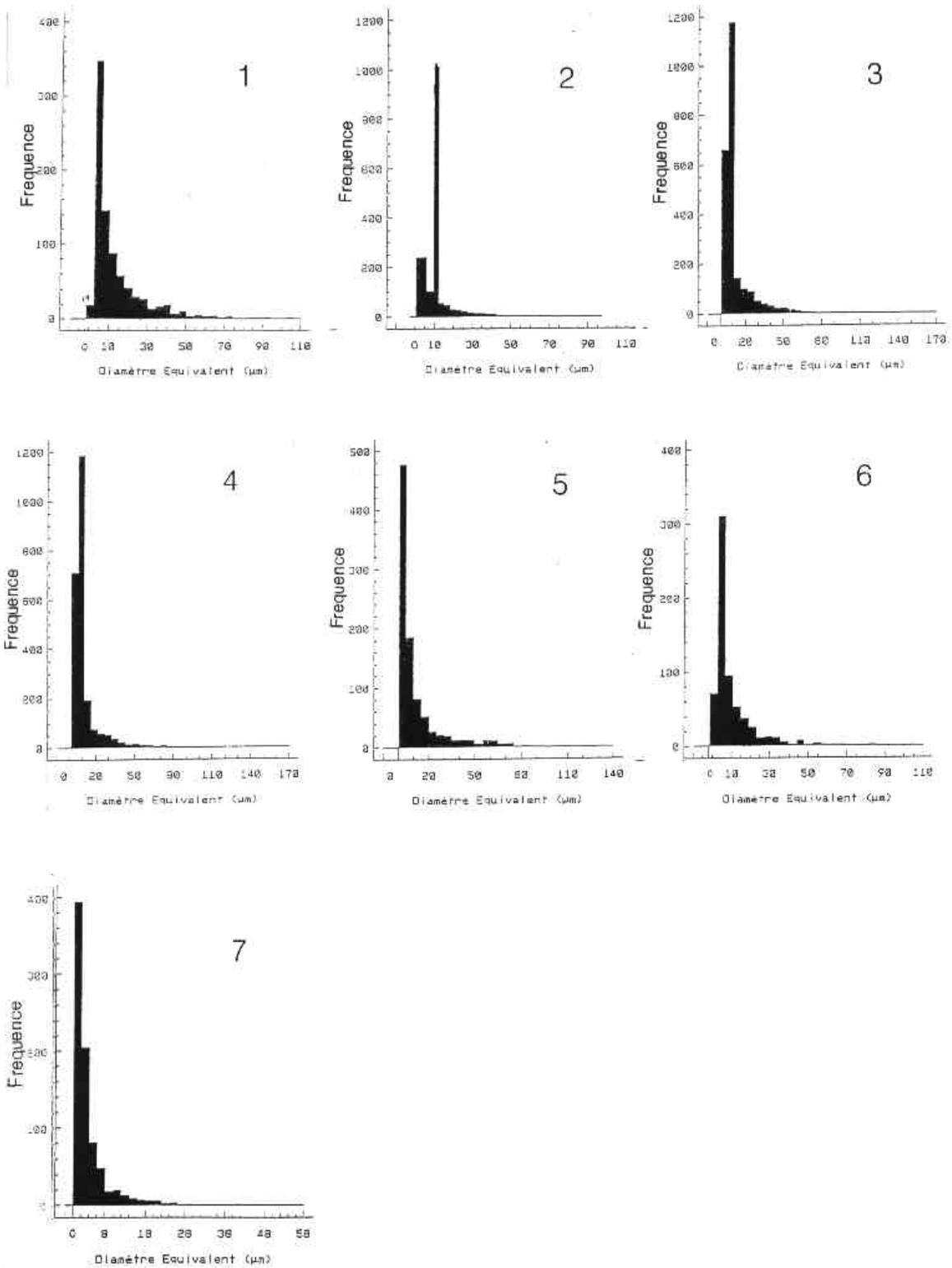
Tête Rhône du Tunnel de la Croix-Rousse

Dépôts de poussières sur les porte-échantillons n° 1 à 7 Répartition Granulométrique suivant le Facteur Forme



Tête Rhône du Tunnel de la Croix-Rousse

Dépôts de poussières sur les porte-échantillons n° 1 à 7 Répartition Granulométrique suivant le Diamètre Equivalent



ANNEXE 2

Histogrammes de répartition des particules déposées

Tunnel de la Croix-Rousse :

suisant le Diamètre Equivalent : échantillons n° 1 à 7

suisant le Facteur Forme : échantillons n° 1 à 7

Tunnel de Fourvière :

suisant le Diamètre Equivalent : échantillons n° 12, 15 et 18

suisant le Facteur Forme : échantillons n° 12, 15, 18

Tête Rhône du Tunnel de la Croix-Rousse

Photographie des dépôts des porte-échantillons n° 1, 2 et 6



Photo 1 33X



Photo 2 133X

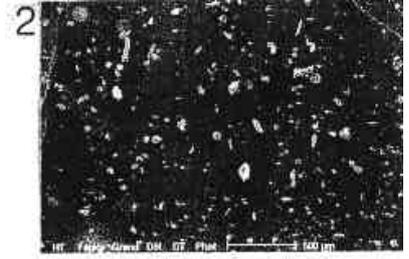


Photo 3 31X

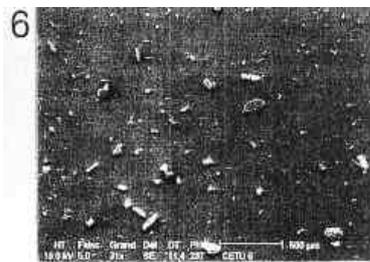


Photo 4 31X



Photo 5 130X

Tête Gorge de Loup du Tunnel de Fourvière

Photographie des dépôts des porte-échantillons n° 15 et 18

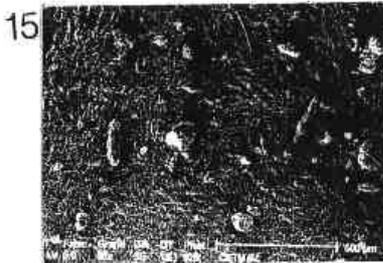


Photo 6 56X

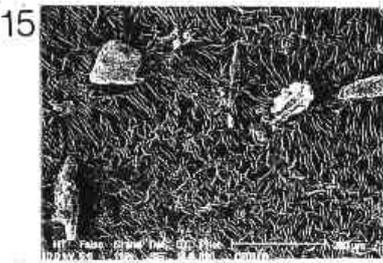


Photo 7 113X



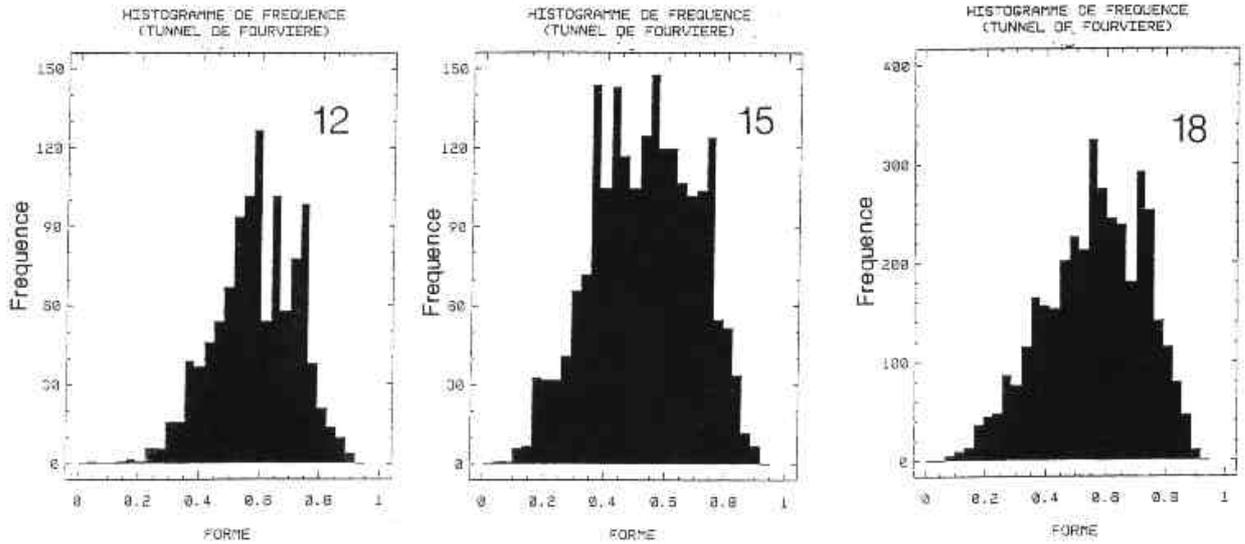
Photo 8 320X



Photo 9 54X

Tête Gorge de Loup du Tunnel de Fourvière

Dépôts de poussières sur les porte-échantillons n° 12, 15 et 18 Répartition Granulométrique suivant le Facteur Forme



Tête Gorge de Loup du Tunnel de Fourvière

Dépôts de poussières sur les porte-échantillons n° 12, 15 et 18 Répartition Granulométrique suivant le Diamètre Equivalent

