

# Pollution de l'air dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire et santé

Dorothée Grange et Sabine Host

*Ces dernières années, les préoccupations en matière de qualité d'air intérieur se sont accrues, en particulier dans les espaces clos ouverts au public. La surveillance de la qualité de l'air de ces espaces a mis en évidence qu'ils étaient parfois plus pollués qu'à l'extérieur. Dans ce contexte, des mesures à l'intérieur des enceintes souterraines de transport ferroviaire ont mis en évidence des niveaux élevés de particules en suspension. La nocivité des particules dans l'air extérieur n'est plus à démontrer, qu'en est-il des particules dans ces enceintes ? Quelles sont les caractéristiques de cette pollution et quels sont les risques sanitaires éventuels pour la population exposée, les voyageurs lors de leurs déplacements mais aussi les professionnels travaillant dans ces enceintes ?*

*Afin de répondre à ces questions, en 2000, les pouvoirs publics ont saisi le Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) en vue, notamment, d'établir des valeurs de référence dans ces milieux. Plusieurs avis ont été émis, avec en particulier des recommandations à destination des exploitants portant sur l'amélioration de la surveillance de la qualité de l'air et la caractérisation fine de la pollution. Alors que la fréquentation de ces espaces est toujours plus importante (cf. encadré 1), des incertitudes demeurent quant aux risques sanitaires potentiels. Ce questionnement est particulièrement prégnant en Île-de-France qui dispose d'une offre de transport collectif riche et d'un réseau parmi les plus denses au monde. Quotidiennement, un grand nombre de voyageurs emprunte ces lignes, avec des temps de parcours en souterrain parfois importants. A l'heure où l'utilisation des transports publics est encouragée pour limiter les*

*émissions atmosphériques liées au trafic automobile, avec un objectif de croissance de 20 % des déplacements en transports collectifs à l'horizon 2020 affiché dans le projet de plan de déplacements urbains (STIF, 2011), le Conseil régional d'Île-de-France a souhaité un éclairage sur cette question.*

*Cette synthèse a ainsi pour objectif de dresser le bilan des connaissances publiées en matière de qualité de l'air dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire, en particulier celles du réseau francilien. Elle développe les aspects suivants : la surveillance, la caractérisation de la pollution et ses déterminants, les expositions, les effets sanitaires potentiels et enfin les actions pour améliorer la qualité de l'air. Cette synthèse se veut axée sur l'exposition et les éventuels risques sanitaires pour la population générale, toutefois, les résultats des études portant sur les travailleurs ont également été considérés afin d'étayer ces considérations.*

## **Encadré 1 : Les enceintes souterraines de transport ferroviaire en Île-de-France en chiffres**

Plus de 300 stations ou gares souterraines de transport ferroviaire sont recensées en Île-de-France. Celles-ci sont essentiellement gérées par la RATP, seules 28 gares souterraines ou mixtes sont gérées par la SNCF. Le réseau ferré francilien comprend 16 lignes de métro, essentiellement souterraines (totalisant 215 km de voies), 5 lignes du réseau express régional (RER), dont environ 76 km sont situés sous terre, et 8 lignes de trains essentiellement aériennes. En 2010, plus de 2,6 milliards de voyages ont été enregistrés sur le réseau ferré avec près de 4 % d'augmentation entre 2006 et 2010 (Omnil, 2011).

Nous adressons nos remerciements à Sophie Mazoué et Napoléon Mattei (RATP) ainsi qu'à Jean-François Ballacey (SNCF) pour nous avoir fourni des éléments concernant l'exploitation de leurs réseaux (stratégie de surveillance, actions, études). Nous tenons également à remercier Matteo Redaelli (Agence nationale de sécurité sanitaire) et Géraldine Le Nir (Airparif) pour leur relecture attentive de ce document.

## La surveillance de la qualité de l'air des enceintes souterraines de transport ferroviaire

La surveillance de la qualité de l'air du métro a été amorcée dès sa création en 1900, avec des analyses microbiologiques d'échantillons d'air ainsi que des mesures des niveaux de monoxyde de carbone et de paramètres de confort (température, humidité). Ces analyses avaient pour objectif de contrôler l'efficacité des systèmes de ventilation et le bon respect des normes d'hygiène (cf. encadré 2). Depuis, la qualité de l'air des enceintes souterraines de transport ferroviaire a fait l'objet de nombreuses études effectuées en partenariat avec différents laboratoires et industriels, tant sur le réseau RATP que SNCF. Cette surveillance a été mise en place, notamment sur la base de protocoles de mesure validés par un groupe d'experts scientifiques réunis au sein de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe). Ainsi, le laboratoire de la RATP réalise des mesures en continu dans trois de ses stations - Châtelet-métro ligne 4, Franklin Roosevelt-métro ligne 1 et Auber-RER A - au niveau des quais (cf. encadré 3), celles-ci constituant le réseau Squales (Surveillance de la Qualité de l'Air de l'Environnement Souterrain). Ce réseau a été mis en place en 1997, avec tout d'abord deux stations de mesure (Châtelet et Franklin Roosevelt). Une station du RER A a, par la suite, complété le réseau en 2006 (cf. encadré 4). Les mesures portent sur les paramètres climatiques usuels (température, humidité relative), le renouvellement d'air (dioxyde de carbone) et la qualité de l'air au travers de quelques polluants indicateurs, soit les oxydes d'azote (NO et NO<sub>2</sub>) et les particules<sup>(1)</sup> (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>). Les préoccupations récentes se sont traduites par l'exigence d'une transparence accrue concernant les niveaux de polluants rencontrés dans ces milieux. C'est pourquoi, en 2007, le Président de la RATP et la secrétaire

### Encadré 2 : L'hygiène dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire

Une foule importante se concentre dans ces espaces restreints. L'hygiène a donc tout naturellement constitué une préoccupation importante dès l'origine de ces infrastructures avec des nettoyages récurrents des enceintes où circulent les voyageurs (quais, couloirs, salles d'échanges...), de l'intérieur des rames elles-mêmes, mais aussi des tunnels avec des opérations de chaulage (chaux projetée sur les parois des tunnels pour son action désinfectante). La surveillance s'est donc en premier lieu intéressée aux paramètres microbiologiques qui ont permis de vérifier l'efficacité des opérations de nettoyage. L'abandon récent de ces mesures témoigne de la bonne qualité microbiologique des enceintes qui constituent un milieu relativement sec, peu propice au développement des micro-organismes, en particulier des moisissures. La question de l'hygiène renvoie également au risque accru de transmission des germes pathogènes, en particulier des virus grippaux en situation d'épidémie de grande ampleur telle que la pandémie grippale observée en 2009. Toutefois, cette question a été exclue du champ de l'étude car elle n'est pas spécifique de ces milieux.

d'État à l'écologie ont annoncé des dispositions concernant la publication des résultats des mesures établies à partir de ce réseau de stations fixes. Ainsi, depuis janvier 2008, les moyennes horaires des niveaux de polluants mesurés sur les trois stations du réseau Squales sont disponibles sur le site Internet de la RATP.

(1) Les particules sont constituées d'un mélange complexe de polluants et sont distinguées généralement selon leur diamètre aérodynamique ; ainsi les PM<sub>10</sub> et les PM<sub>2,5</sub> sont les particules de diamètres respectivement inférieurs à 10 µm et à 2,5 µm.

Par ailleurs, la SNCF a aussi engagé une réflexion sur le choix d'un site de mesure en continu de longue durée (cf. encadré 4) et a retenu dans un premier temps la Gare du Nord Banlieue, au niveau des RER B et D (CSHPF, 2005).

Des campagnes de mesure ponctuelles, tant sur les réseaux RATP que SNCF, permettent de plus d'approfondir les connaissances sur la caractérisation de la pollution de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines, et en particulier de surveiller d'autres paramètres, tels que les particules ultrafines, les aldéhydes, les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) ou polycycliques (HAP).

Deux campagnes de mesure ont notamment été réalisées conjointement par Airparif et la RATP. La première campagne a eu lieu à la station de métro Faidherbe-Chaligny (ligne 1) en décembre 2008 (Airparif et RATP, 2009), la seconde à la station Auber du RER A, en novembre et décembre 2009 (Airparif et RATP, 2010). Les niveaux de NO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> ont été mesurés en différents points (intérieur et extérieur). Le formaldéhyde a été mesuré à la station Auber.

### **Encadré 3 : Implantation des sites de mesure**

Les mesures sont essentiellement réalisées sur les quais, en premier lieu parce que les niveaux de particules observés y sont les plus élevés, tel que cela est spécifié dans la partie « Spécificités » (p. 4). Par ailleurs, les quais offrent des espaces suffisamment dégagés pour accueillir les appareils de mesures. A l'inverse, les mesures embarquées à bord des matériels roulants sont beaucoup plus complexes à réaliser, notamment pour des raisons d'encombrement. Des contraintes liées aux vibrations se posent également.

Des mesures ont également été réalisées sur le réseau SNCF suite à l'adoption du premier Plan régional de la qualité de l'air francilien en 2000. Des études exploratoires ont en particulier été menées en Gare Magenta (RER E). Différentes campagnes ponctuelles ont par la suite été réalisées, dont des mesures embarquées dans les rames, en particulier sur le RER C.

### **Encadré 4 : Stratégie de surveillance**

La surveillance de la qualité de l'air en milieu souterrain a pour objectif d'apporter des données représentatives de la qualité de l'air dans ce milieu, que ce soit par l'intermédiaire d'un réseau fixe de stations de mesure ou de campagnes de mesure ponctuelles. La pertinence de cette surveillance dépend du nombre et de la localisation des stations de mesure, de la durée et de la fréquence d'échantillonnage, de l'équipement de ces stations (matériel de mesure) et des paramètres mesurés. Afin d'améliorer la surveillance, des réflexions sont menées par la RATP et la SNCF, en particulier sur la sélection des sites de mesure. Ainsi, la RATP a confié à l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) en 2004 l'analyse statistique des données du réseau Sqaules et d'une campagne de mesure réalisée entre 2001 et 2003 sur vingt sites souterrains et quinze sites extérieurs. Parmi les recommandations émises par l'Ineris figurait l'importance de compléter le réseau Sqaules avec la surveillance d'une station de RER. Cette recommandation avait également été formulée par le Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) dans son avis de juillet 2003, citant en particulier le RER A (CSHPF, 2003). S'agissant de la SNCF, des mesures de PM<sub>10</sub> de longue durée (12 à 18 mois), complétées par des campagnes ponctuelles, ont eu lieu dans plusieurs lieux (quais, couloirs, salles d'échanges, galeries commerciales) des neuf gares souterraines et mixtes les plus fréquentées du réseau SNCF. L'analyse statistique des données disponibles en 2005 a été réalisée par l'Ineris de façon similaire à celle faite pour la RATP et a permis de conforter la stratégie de surveillance déjà engagée par la SNCF.

## Spécificités de la pollution de l'air dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire

### Des niveaux élevés de particules...

Les différentes campagnes de mesure réalisées dans les enceintes ferroviaires souterraines montrent que les polluants présents dans l'air extérieur sont également présents à l'intérieur des enceintes (excepté l'ozone). Il s'agit notamment des oxydes d'azote et des particules. Alors que les oxydes d'azote sont généralement présents à des concentrations inférieures comparées à celles mesurées à l'extérieur, les particules sont présentes à des niveaux plus élevés dans les enceintes qu'à l'extérieur. Les tableaux 1 et 2 indiquent les niveaux de particules retrouvés dans les logements, les enceintes et en milieu extérieur. Il est rappelé que la surveillance de la qualité de l'air est basée sur la mesure d'indicateurs de pollution (cf. encadré 5). Les mesures réalisées sur le réseau Squales indiquent des concentrations moyennes en PM<sub>10</sub> pour l'année 2010 comprises entre 80 et 200 µg/m<sup>3</sup> (2), tandis que les concentrations

Tableau 1 : Distribution des concentrations de particules dans les logements français (OQAI, 2006)

	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Percentile 25 *	22	14
Médiane	31	19
Percentile 75	57	35
Percentile 95	182	132

\* 25 % des logements présentent une concentration qui est inférieure à la valeur du percentile 25.

horaires maximales peuvent dépasser 1000 µg/m<sup>3</sup> (cf. tableau 2). Le tableau 3 indique, quant à lui, les niveaux mesurés dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire d'autres villes françaises et européennes. Si les mesures actuelles de niveaux de polluants suivent des recommandations issus de consensus d'experts, la surveillance des polluants dans les enceintes ferroviaires souterraines ne bénéficie, pour le

Tableau 2 : Concentrations de particules mesurées sur l'année 2010 en milieu extérieur dans l'agglomération parisienne (niveau de fond et à proximité du trafic routier ; Airparif, 2011a) et dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire franciliennes (réseau Squales ; RATP, 2010)

Concentrations (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub>			PM <sub>2,5</sub>		
	Air extérieur fond	Air extérieur proximité trafic	Enceintes souterraines (1)	Air extérieur fond	Air extérieur proximité trafic	Enceintes souterraines (2)
Annuelle	26 *	52 **	202 **	18 *	30 **	76
Journalière maximale **	87	129	680	69	76	305
Horaire maximale **	171	268	1284	159	96	626

\* moyenne de l'ensemble des stations de fond

\*\* concentration la plus élevée mesurée parmi l'ensemble des stations

(1) maximum observé à la station Auber (RER)

(2) mesure réalisée uniquement à la station Auber (RER)

### Encadré 5 : Pollution de l'air et indicateurs

La pollution atmosphérique résulte d'un mélange complexe de composés émis par différentes sources de pollution et formés lors de réactions chimiques ayant lieu dans l'atmosphère. En pratique, cette pollution n'est appréciée qu'au travers de quelques polluants indicateurs dont les niveaux sont censés refléter la pollution atmosphérique globale et les différentes sources de pollution rencontrées. Ainsi, ces niveaux témoignent de situations de pollutions différentes d'un pays à l'autre, d'une ville à l'autre mais aussi, et surtout, d'un milieu à l'autre. Il convient donc de comparer avec prudence les concentrations relevées en milieu extérieur et dans les espaces clos, en particulier les concentrations massiques de particules, elles-mêmes de compositions très hétérogènes, car elles peuvent refléter des risques sanitaires différents (Seaton et al., 2005).

(2) sur les trois stations du réseau Squales

**Tableau 3 : Concentrations de particules dans les enceintes ferroviaires souterraines de différentes villes mesurées lors de campagnes ponctuelles**

Ville	Moyenne journalière (min - max) <sup>(1)</sup>	Maximum horaire	Période d'échantillonnage	Nombre de points de mesure (stations)	Date de mise en service du métro	Référence
<b>Concentrations de PM<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>						
Londres	270 - 480	-	3 jours (7h-17h)	3	1863	Seaton et al., 2005
Helsinki	47 - 60	103	2 semaines (6h-18h)	2	1982	Aarnio et al., 2005
<b>Concentrations de PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>						
Rome	348 - 479	-	1 jour (8h-18h)	5	1955	Ripanucci et al., 2006
Toulouse	32 - 151	463	2 semaines (été) 2 semaines (hiver)	2	1993	Oramip, 2010
Lyon	58 - 171	469	2 semaines	4	1978	Coparly, 2002
Lille	45 - 136*	289	4 semaines (été) 4 semaines (hiver)	2	1983	Atmo NPC, 2008
Rennes	18 - 88	188	4 semaines (été) 4 semaines (hiver)	2	2002	Air Breizh, 2005
Marseille	74 - 90	285	20 jours à 7 mois	3	1977	Atmo Paca, 2011

<sup>(1)</sup> sur la période d'étude, min et max correspondant aux différents points de mesures (quelles que soient la station et la saison)

\* moyenne été-hiver

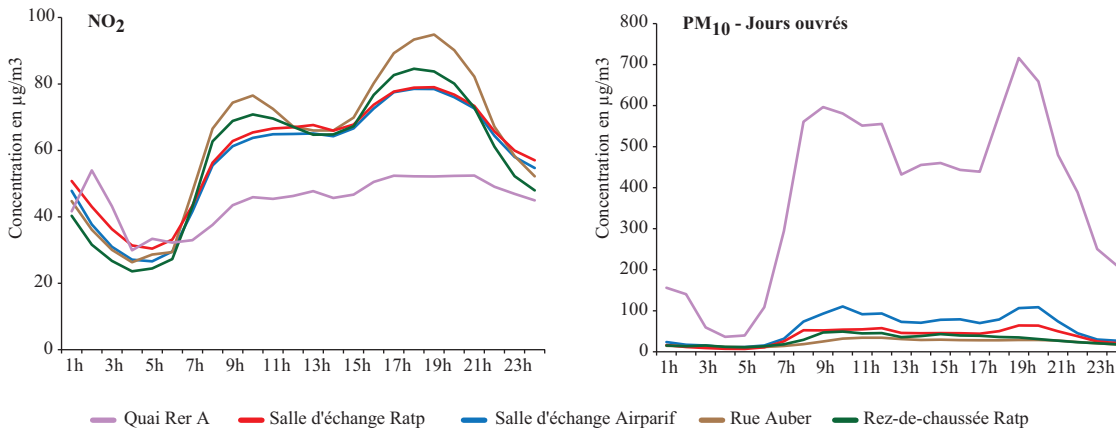
moment, d'aucun protocole standardisé à l'échelle internationale comme nationale. Ainsi, les méthodes de mesure peuvent varier d'un opérateur à l'autre, de même que les protocoles d'échantillonnage. Ainsi, ces valeurs sont à comparer avec prudence. Au niveau national, une réflexion est menée au sein du Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air afin d'établir, notamment dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire, un protocole standardisé de mesure visant à préconiser des stratégies

d'échantillonnage, de mesures et d'analyses.

**... avec une grande variabilité spatio-temporelle**

L'évolution de ces niveaux de polluants au cours de la journée présente par ailleurs un profil marqué par des concentrations maximales aux heures d'affluence : deux pics de concentration sont observés au cours d'une journée, aux heures de pointe du matin et du soir (cf. figure 1). Les concentrations sont également plus élevées en semaine que le week-end.

**Figure 1 : Profils journaliers de NO<sub>2</sub> et PM<sub>10</sub> relevés à la gare RER d'Auber et à proximité du trafic (rue Auber) du 10 novembre au 8 décembre 2009 (Airparif et RATP, 2010)**



En outre, les niveaux de polluants varient fortement selon la localisation au sein de la station (quais, couloirs, différents niveaux...), tel que l'illustre la campagne de mesure réalisée dans la gare RER d'Auber (cf. figure 1), mais aussi selon les lignes de métro ou de RER considérées. Par ailleurs, certaines campagnes de mesure ponctuelles ont montré des concentrations notables d'HAM ou HAP sur certains sites particuliers.

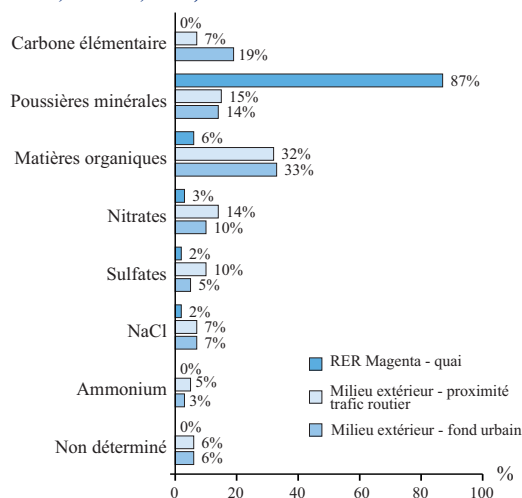
Concernant l'air à l'intérieur des rames, les mesures réalisées en 2002 par la SNCF à l'intérieur des rames du RER C (entre Austerlitz et Saint-Ouen) montrent que les niveaux de PM<sub>10</sub> sont plus faibles que sur les quais et dans les couloirs et salles d'échange, même s'ils restent supérieurs aux niveaux de PM<sub>10</sub> mesurés en surface. Ces niveaux sont par ailleurs plus élevés en été qu'en hiver, ce qui peut s'expliquer par une ouverture plus fréquente des fenêtres favorisant la pénétration des particules dans les trains. Les profils mesurés au cours des trajets dénotent toutefois un abaissement des niveaux lors des passages à l'air libre. Enfin, les matériels roulants les plus récents sont dotés de systèmes de filtration permettant une diminution des concentrations de particules dans les rames.

### Une composition spécifique des particules

Les analyses chimiques réalisées en gare de Magenta en 2000 ont montré une certaine spécificité des particules retrouvées dans les enceintes souterraines, avec notamment une large prédominance des poussières minérales (cf. figure 2). Ces dernières comprenaient en outre des proportions importantes d'éléments métalliques dont le fer est l'élément prépondérant. Il représentait 30 % des poussières analysées en gare de Magenta, 42 % à la station Châtelet de la ligne 11 du métro et 61 % à la station Nation du RER A (Bachoual, 2007). D'autres éléments métalliques sont également retrouvés en proportions plus élevées dans les enceintes souterraines qu'à l'extérieur, tels le baryum, le cuivre, le chrome, le manganèse...

Par ailleurs, les particules dites grossières (de diamètre compris entre 2,5 µm et 10 µm) apparaissent prépondérantes en masse durant la

Figure 2 : Composition des PM<sub>10</sub> selon le milieu (Airparif, 2011b ; Fortain, 2008)



journée. Lors de la campagne de mesure à la station Faidherbe-Chaligny, elles représentaient 54 % des teneurs en PM<sub>10</sub> à l'intérieur de la station, contre 32 % à l'extérieur (Airparif et RATP, 2009). De même, lors de la campagne à la station RER d'Auber, cette fraction représentait près des deux tiers des teneurs en PM<sub>10</sub> au niveau du quai (Airparif et RATP, 2010).

### Différentes sources de pollution, notamment liées à l'usure du matériel

Les polluants présents dans les enceintes souterraines proviennent de sources diverses. Tout d'abord, l'air extérieur pénétrant dans les enceintes souterraines par les ouvertures des stations et le réseau de ventilation, les polluants de l'air extérieur se retrouvent dans l'air de ces enceintes. C'est notamment le cas des polluants issus du trafic routier tels le NO<sub>2</sub> ou encore des HAM ou HAP.

L'activité ferroviaire est aussi une source de pollution, de par notamment l'usure du matériel (usure des freins, frottements roues/rails...). Les systèmes de freinage sont en particulier le lieu de frottements intenses, qui sont à l'origine d'une grande partie de la pollution particulaire, engendrant notamment des particules de fraction grossière. L'usure du matériel explique aussi la présence d'éléments métalliques au sein des particules. Les travaux d'entretien et de maintenance réalisés principalement au cours de la nuit sont également une source de polluants,



notamment d'oxydes d'azote et de particules (meulage des rails en particulier).

### De nombreux déterminants des niveaux de polluants

De nombreux facteurs peuvent influencer sur les niveaux de polluants rencontrés dans les enceintes souterraines de transport (Fortain, 2008). Tout d'abord, la densité du trafic des trains a un impact important, en particulier sur les concentrations de particules. En effet, plus le nombre de trains circulant dans la station est important, plus les émissions de particules sont importantes. De plus, aux heures de pointe, la fréquence des trains est plus élevée et les trains sont plus chargés en voyageurs, d'où un freinage plus intense et davantage de particules émises. Par ailleurs, de par l'activité de la station, les particules sont sans cesse remises en suspension dans l'air, lors des passages des trains, des déplacements des voyageurs et par les multiples courants d'air

(Fortain, 2008). Les caractéristiques des trains circulant (cf. paragraphe précédent) ont également une influence sur la pollution rencontrée dans les enceintes souterraines, que ce soit en termes de quantité de particules émises ou de nature chimique de ces particules. L'architecture de la station joue en outre un rôle, en particulier la surface et le volume de la station, le nombre et la disposition des voies, la présence de différents niveaux, d'interconnexions, l'emplacement des bouches d'aération, le nombre de sorties vers l'extérieur... Additionné à cela, les performances du dispositif de ventilation influent bien évidemment sur le taux de renouvellement de l'air dans les enceintes souterraines. Enfin, la localisation de la station par rapport aux sources extérieures de pollution, telles qu'une rue à fort trafic routier, est un facteur à prendre en compte, en particulier pour les polluants dont les sources sont principalement extérieures aux stations, comme le  $\text{NO}_2$ .

## Expositions aux polluants lors des déplacements

Les individus fréquentent au cours de leurs journées de nombreux lieux de vie (transports, domicile, extérieur, bureau, école...). L'exposition globale aux polluants de l'air résulte de la somme des expositions dans ces différents micro-environnements. Il a été montré que les transports, et plus particulièrement ceux liés aux trajets quotidiens entre le domicile et le lieu de travail (modes individuels motorisés ou non et transports en commun), pouvaient apporter une contribution significative à l'exposition globale en raison du temps consacré et des niveaux élevés de polluants

rencontrés dans ces milieux. Les résultats de l'Enquête globale des transports (EGT) et de l'enquête relative au trafic journalier du réseau ferré (TJRF) conduite par la RATP en 1997 montrent que certains usagers peuvent passer plus de deux heures par jour dans le réseau ferré souterrain francilien. Le CSHPF a considéré quatre durées quotidiennes de séjour variant de 1 heure 30 à 2 heures 15 pour l'élaboration de valeurs guide de la qualité de l'air intérieur dans les enceintes ferroviaires souterraines (cf. encadré 6). Les études effectuées par la RATP

### Encadré 6 : Valeurs de référence dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire

Dans son avis du 3 mai 2001, le CSHPF a recommandé une valeur de référence de la qualité de l'air intérieur dans les enceintes ferroviaires souterraines (CSHPF, mai 2001). Elle vise à garantir le respect de la valeur limite journalière pour l'indicateur  $\text{PM}_{10}$  (soit  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , à ne pas dépasser plus de 35 fois par année civile) et donc est indexée sur les niveaux quotidiens de pollution de l'air extérieur. En 2005, pour une durée quotidienne de séjour dans les enceintes ferroviaires souterraines de 2 heures, la concentration de référence calculée par le CSHPF était de  $347 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (sur la base du seuil de concentration des 10 % de jours les plus pollués de l'année (P90), soit  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En 2010, si le même calcul était appliqué, la concentration de référence s'élèverait à  $145 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (P90=41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dans l'air extérieur). Ce calcul présente toutefois des limites puisque d'une part, il ne tient pas compte de la composition des particules et d'autre part, il ne considère pas l'ensemble des micro-environnements fréquentés par la population.

et la SNCF indiquent que la durée moyenne journalière passée en souterrain par les usagers de leur réseau est de l'ordre d'une heure.

Par ailleurs, une étude menée en Île-de-France fournit des éléments relatifs à l'exposition individuelle des usagers des transports souterrains ainsi que des éléments de comparaison par rapport aux autres modes de déplacement (cf. encadré 7). La figure 3 illustre les niveaux d'exposition aux PM<sub>2,5</sub> et NO<sub>2</sub> estimés au cours des différents déplacements. Cette étude montre que l'usager d'un véhicule particulier est globalement le plus exposé, notamment lorsqu'il emprunte le boulevard périphérique (Delaunay et al., 2010). Comparés à ceux relevés lors d'autres modes de déplacements, les niveaux d'exposition au dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), benzène, toluène, monoxyde de carbone (CO) et carbone suie sont en effet globalement plus élevés.

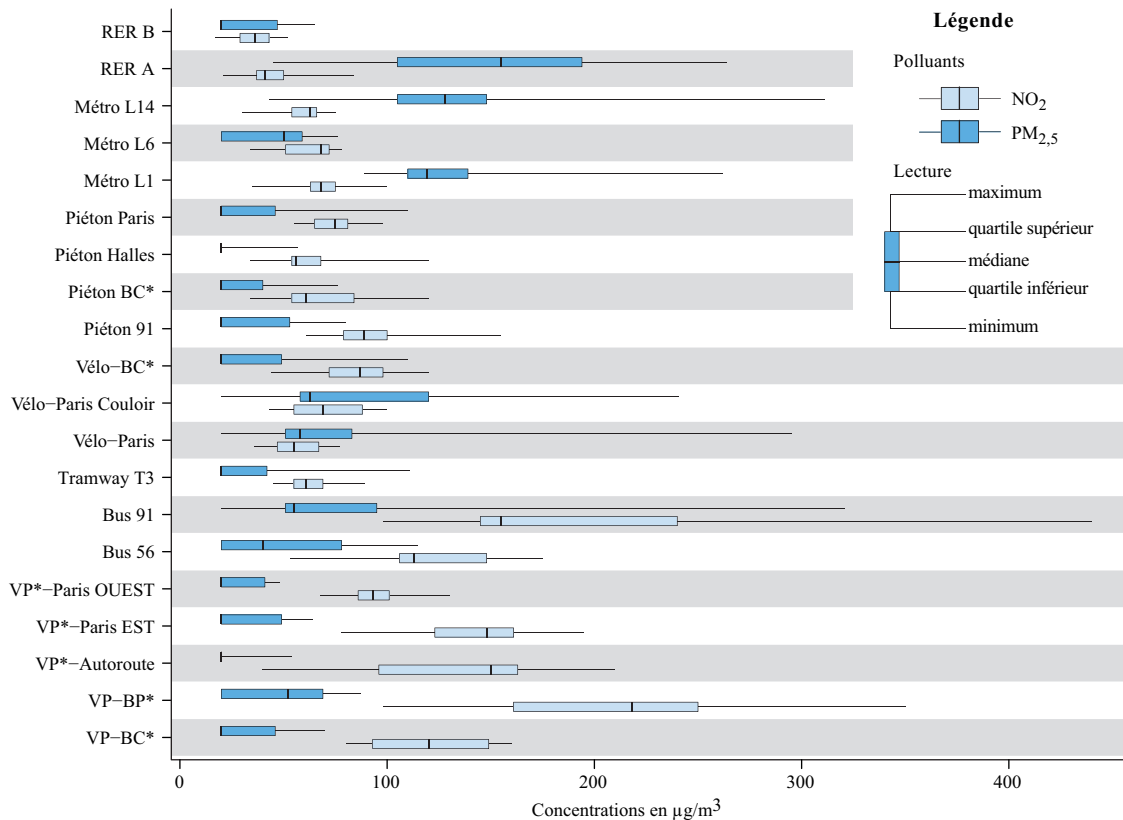
Les niveaux d'exposition aux polluants gazeux

**Encadré 7 : Évaluation de l'exposition des Franciliens aux polluants atmosphériques au cours de leurs déplacements (Delaunay et al, 2010)**

Des mesures de divers polluants ont été réalisées au cours des périodes hivernales de 2007 et 2008, aux heures de pointe du matin et du soir, entre le domicile et le lieu de travail pour 20 trajets-types d'égale durée (1 heure), combinant 16 itinéraires et différents modes de déplacement usuels (véhicule particulier, bus, métro, tramway, vélo et marche). Chaque trajet type au cours duquel ont été réalisés les mesurages a été reproduit 30 fois.

sont par ailleurs faibles dans les rames de métros et dans les RER. En revanche, les trajets sur les lignes dont le parcours est essentiellement souterrain sont caractérisés par une exposition à la pollution atmosphérique particulière relativement

**Figure 3 : Comparaison des niveaux d'exposition aux particules PM<sub>2,5</sub> et NO<sub>2</sub> mesurés au cours des différents déplacements (30 essais) (Delaunay et al, 2010)**



\* BC : boulevard circulaire  
 VP : véhicule particulier  
 BP : boulevard périphérique



élevée. Ainsi sur les lignes L14 et L1 et sur le RER A, les niveaux d'exposition médians aux  $PM_{2,5}$  sont compris entre 119 et 155  $\mu g/m^3$  et les maxima atteignent respectivement 311, 262 et 264  $\mu g/m^3$  alors que les niveaux relevés au cours des trajets en voiture n'atteignent généralement pas la limite de quantification (40  $\mu g/m^3$ ).

L'exposition en vélo est généralement intermédiaire pour tous les polluants. Malgré sa proximité géographique au trafic automobile, la configuration « à l'air libre » dans laquelle se trouve le cycliste conduit à une diminution assez nette des niveaux de la plupart des polluants. L'exposition des passagers du bus est souvent intermédiaire entre celles de l'automobiliste et du cycliste. Le piéton marchant dans le quartier piétonnier (Halles) et l'utilisateur du tramway sont, quant à eux, les moins exposés, tous polluants

confondus. Les piétons empruntant les autres itinéraires ont des niveaux d'exposition intermédiaires.

Cette étude montre en outre que les niveaux d'exposition aux particules des usagers des transports souterrains sont variables selon les lignes de transport considérées. Il semble donc difficile de définir un trajet type représentatif d'une exposition moyenne des usagers. En effet, d'une part les niveaux de polluants, influencés par de nombreux paramètres (matériels roulants, système de freinage, configuration de la station, système de ventilation...), sont variables d'une station à l'autre et d'autre part les profils de fréquentation des différentes enceintes (lignes empruntées, temps de parcours des usagers) sont nombreux.

## Effets sanitaires potentiels liés à l'exposition à la pollution de l'air des enceintes souterraines de transport ferroviaire

De nombreux travaux ont étudié les effets potentiels de la pollution atmosphérique urbaine sur la santé. Ainsi, la nocivité des particules en suspension dans l'air ambiant est aujourd'hui reconnue. L'exposition aux particules atmosphériques est à l'origine de phénomènes inflammatoires et de stress oxydatif agissant directement sur les fonctions respiratoires. Elle favorise également la progression de l'athérosclérose ainsi que des perturbations du système de coagulation. Par ailleurs, une action directe des particules sur la variabilité du rythme cardiaque est également évoquée (Brook et al., 2009). La combinaison de ces phénomènes a un retentissement sur les pathologies cardiovasculaires. Si les liens entre exposition à la pollution atmosphérique et pathologies cardiorespiratoires sont aujourd'hui bien admis, les constituants spécifiques à l'origine de ces effets ne sont pas clairement identifiés et leurs mécanismes d'action ne sont pas totalement élucidés (Dockery, 2009). Comme indiqué dans la partie sur les spécificités (p. 4), la pollution de

l'air des enceintes souterraines de transport ferroviaire, caractérisée par des niveaux élevés de particules, avec de fortes proportions de particules métalliques, est essentiellement influencée par la circulation du matériel roulant. Or, la pollution de l'air extérieur, mélange complexe de polluants gazeux et particulaires, est largement influencée par les phénomènes de combustion, notamment liés au trafic. La surveillance réglementaire en milieu extérieur instaure le suivi des concentrations massiques de  $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$ . Ainsi, les effets sanitaires de la pollution atmosphérique ambiante ont été évalués sur la base de cet indicateur qui n'a pas la même signification du point de vue sanitaire lorsque les sources considérées sont aussi différentes (Karlsson et al., 2006 ; Klepczynska Nystrom et al., 2010 ; Seaton et al., 2005). Le risque sanitaire potentiel lié à l'exposition aux pollutions de l'air des enceintes souterraines de transport ferroviaire reste ainsi à évaluer spécifiquement. Ce risque peut être apprécié au travers de différentes approches complémentaires. D'un côté, les études

toxicologiques permettent d'examiner les mécanismes biologiques d'action des polluants sur les tissus ou les systèmes (cf. encadré 8). De l'autre, les études épidémiologiques déterminent les effets potentiels d'une exposition au milieu en comparant l'état de santé de groupes exposés et non exposés (effets à long terme) ou de mêmes individus, avant et après une exposition (effets à court terme). A ce jour, les travaux publiés sont peu nombreux, cette partie recense les études menées en France et à l'étranger dans les différentes disciplines, et inclut les résultats des travaux menés sur les travailleurs au sein des enceintes souterraines. Ces données restent cependant très parcellaires et ne permettent pas de conclure de manière univoque, d'autant plus que certains résultats ont été obtenus à partir d'échantillons relevés dans des enceintes souterraines de transport ferroviaire de villes différentes. Par ailleurs, la plupart des évaluations ayant été menées chez les travailleurs, ces résultats ne peuvent pas être directement transposés à la population générale qui comporte des individus plus sensibles tels que les enfants, les personnes âgées, les malades chroniques.

#### **Toxicologie des particules des enceintes souterraines de transport ferroviaire**

La toxicologie des particules prélevées dans l'air des enceintes souterraines de transport ferroviaire (métro, RER) a jusqu'à présent fait l'objet de peu de travaux. Ainsi, seulement quelques études, menées notamment à Londres, à Paris et à Stockholm, ont été recensées. Ces travaux semblent indiquer que ces particules entraînent des effets au niveau cellulaire (modification de marqueurs de stress oxydant et d'inflammation, génotoxicité, cytotoxicité), majorés par rapport à ceux induits par des particules issues d'autres sources (fond urbain, diesel). Toutefois, les mécanismes et les composants responsables de ces effets n'ont pas pu être clairement identifiés, avec parfois des résultats discordants, bien que le rôle du fer ait été suggéré. Quant aux implications physiopathologiques, d'autres travaux doivent être menés. En l'état actuel des connaissances, ces effets biologiques ne peuvent être traduits en effets sanitaires potentiels (symptômes ou pathologies).

#### **Encadré 8 : Apport et limites des études toxicologiques (Marano et al., 2004)**

La toxicologie a joué un rôle important au cours des dernières années dans la compréhension des effets biologiques des particules atmosphériques. Elle implique des études en condition contrôlée in vivo ou in vitro qui permettent d'établir des relations dose/effet très difficiles à mettre en évidence dans les études épidémiologiques. Elle vise également à déterminer des seuils au-dessous desquels les effets biologiques ne s'observent pas. Elle donne des informations sur le rôle de composants spécifiques dans les réponses biologiques. Elle permet d'étudier les associations de polluants. Enfin, elle est nécessaire pour comprendre les mécanismes d'action qui sont potentiellement responsables des réponses physio-pathologiques chez les individus exposés. Toutefois, elle présente ses limites, dans la mesure où il n'est pas possible de reconstituer en laboratoire la complexité du corps humain et les conditions réelles d'exposition.

#### *Une toxicité accrue au niveau cellulaire*

Les effets biologiques de particules (PM<sub>10</sub>) obtenues dans deux stations du réseau RATP (stations Nation-RER A et Châtelet-métro ligne 11) ont été examinés (Bachoual et al., 2007). Cette étude a révélé que ces particules induisaient au niveau cellulaire une augmentation de la production des médiateurs de l'inflammation induite par le système immunitaire (cf. encadré 9) et que cette production était majorée comparée à celle induite par les différentes particules témoins (noir de carbone, dioxyde de titane, particules diesel). Les résultats de travaux menés sur la toxicité des particules (PM<sub>10</sub>) prélevées dans le métro de Stockholm (Karlsson et al., 2005) et de Londres (Seaton et al., 2005), comparée à celle d'autres particules atmosphériques (fond urbain, diesel...) vont dans le même sens. Ainsi, les particules du métro de Stockholm ont montré une capacité oxydative, testée sur des cellules épithéliales pulmonaires, quatre fois plus élevée

que les particules urbaines. Bien que ces phénomènes inflammatoires jouent un rôle prépondérant dans les pathologies chroniques pulmonaires, on ne peut pas extrapoler ces effets biologiques en termes de genèse de pathologies (cf. encadré 8). Par ailleurs, les concentrations des extraits de particules auxquels ont été exposées les cellules sont bien plus élevées que celles qui peuvent être atteintes dans les régions alvéolaires des poumons des individus fréquentant ces enceintes souterraines, qu'il s'agisse de voyageurs ou de travailleurs. En effet, Seaton et al. ont estimé que la concentration à laquelle apparaissent les effets observés est environ 40 000 fois supérieure à celle qui peut être atteinte au niveau alvéolaire pour un travailleur du London Underground (Seaton et al., 2005). De plus, les effets inflammatoires observés in vivo (test chez le rongeur) restent transitoires, ils disparaissent au bout de 24 heures (Bachoual et al., 2007). Toutefois, la question des effets d'une exposition répétée à faible dose reste entière, d'autres études seraient nécessaires afin d'examiner l'éventualité d'une modification structurelle des poumons. L'étude menée à Stockholm s'est également intéressée à la génotoxicité et a mis en évidence que les particules du métro provoquaient, à concentration équivalente, des lésions sur l'ADN (tests des comètes) plus importantes que les particules prélevées en milieu extérieur. Une génotoxicité huit fois plus importante a été estimée.

#### *Rôle de la composition : effet partiel du fer*

Comme indiqué précédemment, les particules relevées dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire sont caractérisées par leur richesse en fer. Tout naturellement, les études expérimentales ont exploré le possible rôle du fer dans la toxicité des particules du métro. Outre la proportion de fer, la forme soluble ou insoluble ainsi que l'état d'oxydation de cet élément sont à considérer pour évaluer sa toxicité. L'analyse des composés cristallins par Karlsson et al. (2008) indique que les particules urbaines se présentent sous la forme d'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), alors que les particules du métro se présentent majoritairement sous la forme de magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) plus à même de libérer des radicaux libres entraînant une inflammation. Par ailleurs, il semblerait que la capacité oxydative des particules du métro soit essentiellement liée aux particules ferriques insolubles ayant une réactivité surfacique importante, alors que pour les particules de l'air extérieur en milieu urbain, la toxicité semblerait plus liée à la fraction soluble. Ces éléments militent en faveur d'un rôle du fer important dans la toxicité des particules souterraines. Cependant, dans l'étude menée à Paris, alors que les particules du RER et du métro sont très différenciées en termes de teneur en fer, les tests de toxicité réalisés sur ces deux types d'échantillon montrent les mêmes effets biologiques, ce qui invite à penser que le fer ne jouerait pas un rôle majeur dans ces effets (Bachoual et al., 2007). Ceci est

#### **Encadré 9 : Inflammation, stress oxydatif et génotoxicité**

Les particules, en fonction de leur diamètre aérodynamique, sont capables de pénétrer plus ou moins profondément dans le système respiratoire et de se déposer dans le poumon. Le phénomène de clairance<sup>(3)</sup> pulmonaire permet généralement de les éliminer. Toutefois, notamment en cas d'épisodes de forte concentration, les particules peuvent s'accumuler localement et provoquer, au niveau cellulaire, une inflammation avec la libération de médiateurs chimiques et d'espèces réactives de l'oxygène (ou radicaux libres). Celle-ci peut s'étendre au niveau systémique et entraîner l'apparition de pathologies respiratoires et cardio-vasculaires. Ces molécules induites pourraient être également à l'origine de mécanismes génotoxiques qui peuvent aussi être directement liés aux substances toxiques elle-même, telles que les HAP portées par les particules. Selon les pouvoirs de réparation de l'ADN, cette génotoxicité peut être à l'origine du développement de pathologies cancéreuses.

(3) capacité à éliminer d'un fluide une substance donnée

confirmé par une persistance des effets après abatement du fer. Si ces premiers résultats semblent indiquer un rôle du fer limité, d'autres travaux doivent être menés afin de déterminer son rôle exact. Par ailleurs, la toxicité éventuelle du fer n'a pas été décelée chez des travailleurs exposés par inhalation à des niveaux élevés de particules ferriques (tel que les soudeurs à l'arc). En effet, chez ces travailleurs, la survenue de sidéroses pulmonaires a été observée. Cette maladie professionnelle se traduit par une surcharge en fer à l'intérieur du poumon laissant apparaître des anomalies à la radiographie mais affecte peu la fonction respiratoire. Elle ne témoigne pas d'une toxicité particulière du fer (INRS, 2011). Toutefois, une étude a montré des associations entre exposition à des fumées métalliques et la survenue de pneumonies (Palmer et al., 2003).

L'effet des particules pourrait aussi être lié à d'autres composants tels que les endotoxines<sup>(4)</sup>, mais de très faibles niveaux sont observés. D'autres composants tels que les HAP, les quinones<sup>(5)</sup> ainsi que les autres métaux pourraient également être en cause, toutefois leur biodisponibilité doit encore être évaluée. Enfin, la question des effets synergiques de ces composants reste entière (Bachoual et al., 2007).

### Résultats des études épidémiologiques

Les études épidémiologiques permettent d'approcher les effets d'une exposition aux polluants des enceintes souterraines de transport ferroviaire via la comparaison de l'état de santé d'individus exposés et non exposés.

Une approche consiste à comparer les ratios d'incidence ou de mortalité au sein de cohortes de travailleurs plus particulièrement exposés à ce milieu à ceux de la population générale ou d'autres catégories de travailleurs. Ces études descriptives permettent d'apprécier, dans une certaine mesure, les effets à long terme d'une exposition chronique aux polluants de l'air des enceintes souterraines liée à la pratique professionnelle.

Selon cette approche, une étude de la mortalité des agents de la RATP a été réalisée par la RATP en coopération avec l'Institut de veille sanitaire (InVS). L'objectif était de décrire les causes de décès de cette population, de repérer d'éventuels

excès de risque, et d'examiner des associations entre risques de décès, caractéristiques professionnelles et expositions à certaines nuisances. Les analyses ont concerné près de 70 000 agents ayant travaillé au moins un an à la régie entre 1980 et 1999 (cohorte EDGAR), parmi lesquels 5 130 décès sont survenus (y compris après le départ en retraite). Il est observé que leur mortalité est moins élevée que celle des Franciliens, ce qui est une caractéristique classique des cohortes professionnelles larges, en moyenne en meilleure santé que la population générale de même âge. Il existe ainsi une sous-mortalité par cancer significative de 10 % chez les hommes et de 14 % chez les femmes. Un excès significatif de décès par cardiopathie ischémique est toutefois observé pour les hommes, mais ne peut être interprété plus avant en l'absence d'analyses spécifiques en fonction des caractéristiques professionnelles (Campagna et al., 2008). L'analyse des causes de décès par catégories socioprofessionnelles, métiers et expositions à certains facteurs professionnels permettra d'étudier de façon plus spécifique l'existence de risques éventuels chez ces travailleurs, et leurs liens possibles avec des conditions de travail. Selon la même approche, dans une étude menée à Stockholm, il a été montré que l'incidence de cancers du poumon n'était pas plus élevée chez les conducteurs du métro que chez d'autres travailleurs (transport et télécommunications) (Gustavsson et al., 2008).

Récemment, le service de santé au travail de la RATP a mené une étude épidémiologique parmi ses salariés (Campagna et al., 2010). Cette enquête a porté sur environ 2 000 participants entre 2006 et 2007. Elle visait à comparer l'état de santé de travailleurs soumis à l'air des enceintes souterraines de transport ferroviaire à celui d'autres personnels ne travaillant pas dans ces espaces, à l'exception des conducteurs de bus. L'échantillon a été divisé en trois classes d'exposition déterminées selon le pourcentage de temps passé dans les enceintes par les participants, soit moins de 10 % du temps pour la catégorie de référence (les « non exposés »), plus de 90 % pour les « exposés », et entre 10 et 90 % pour la catégorie intermédiaire. Les conducteurs de train

(4) toxines contenues dans la paroi de certaines bactéries et libérées lors de la destruction des germes

(5) autres composés organiques entrant dans la composition des particules

ont été classés dans la catégorie « exposés », quels que soient les parcours effectués, y compris pour partie en surface. La santé respiratoire des participants a été évaluée à l'aide d'un questionnaire (bronchite chronique, difficultés à respirer, dyspnée, asthme, rhinite et éruptions cutanées). Par ailleurs, la fonction pulmonaire a été évaluée à l'aide de tests respirométriques. Il n'a pas été mis en évidence de lien entre le pourcentage élevé de temps passé en souterrain et une altération de la fonction respiratoire. Il en est de même pour les symptômes respiratoires étudiés. Ainsi, ces premiers résultats ne mettent pas en évidence de risque lié à l'exposition aux polluants des enceintes souterraines de transport ferroviaire sur la santé respiratoire des travailleurs. En l'état actuel des connaissances, il n'est toutefois pas possible de conclure à l'absence de risque. Ainsi, l'analyse de ces résultats doit se poursuivre avec, notamment, la distinction des différents métiers afin d'affiner l'estimation des expositions, ainsi que la prise en compte du parcours professionnel afin de distinguer les effets potentiels d'une exposition à long terme. D'autres pathologies, en particulier des pathologies cardio-vasculaires, seront également considérées.

Grass et al. (2010), quant à eux, ont évalué l'exposition aux particules métalliques (Fe, Cu, Cr) de 39 travailleurs du métro new-yorkais, 11 conducteurs de bus et 25 employés de bureau, ainsi que la présence dans le sang et les urines de biomarqueurs d'effet. Ils n'ont mis en évidence aucun lien entre le niveau d'exposition et les niveaux de biomarqueurs retrouvés dans les fluides. Ces résultats ne permettent pas non plus de conclure à l'absence d'effet compte-tenu de la faible taille d'échantillon ainsi que la spécificité des marqueurs relevés.

D'autres études avec une approche plus expérimentale ont également été menées. Une étude suédoise, portant sur 81 employés de la compagnie de métro de Stockholm répartis en trois groupes de niveau d'exposition aux particules du métro, a ainsi mesuré l'évolution, au cours de la journée de travail, de la fonction respiratoire, des marqueurs d'inflammation pulmonaire et des marqueurs de risque de maladie cardio-vasculaire. Aucun effet à court terme attribuable à l'exposition

aux particules n'a pu être décelé, ce qui n'exclut pas un effet à long terme. En revanche, les niveaux des marqueurs de risque de maladie cardio-vasculaire avaient tendance à être plus élevés chez les employés plus particulièrement exposés aux particules du métro (Bigert et al., 2011; Bigert et al., 2008). Dans une autre étude suédoise, les mêmes marqueurs ont été évalués chez 20 volontaires exposés pendant deux heures à l'air d'une plate-forme d'une enceinte souterraine du métro. A titre de comparaison, ces mêmes volontaires soumis à une atmosphère de bureau constituaient leur propre témoin (Klepczynska Nystrom et al., 2010). Si des effets subjectifs tels qu'irritations des voies respiratoires et gêne olfactive étaient ressentis en situation d'exposition, aucune modification significative de la fonction respiratoire, ni élévation des marqueurs de l'inflammation bronchique n'ont été relevées. Seule une augmentation de l'expression des marqueurs de régulation des cellules T ainsi que des taux de fibrinogènes sanguins a été notée, ce qui constitue une réponse biologique mineure qui ne peut être interprétée en termes d'effets sanitaires proprement dits. Le même protocole a été appliqué à des volontaires asthmatiques modérés. Une réponse différente de celle des volontaires « sains » a été relevée avec une activation de la production de marqueurs de l'inflammation au niveau pulmonaire uniquement et non au niveau sanguin. Ces différences mériteraient d'être investiguées de manière plus approfondie afin de conclure à un éventuel risque sanitaire (Klepczynska-Nystrom et al., 2012).

Ces études permettent d'appréhender les éventuels effets à court terme, d'autres études se sont intéressées aux effets à plus long terme faisant suite à une exposition chronique. Ainsi, dans une étude cas-témoin, tous les cas de première survenue d'infarctus du myocarde entre 1976 et 1996 dans le comté de Stockholm ont été recensés (n=22 311). Des témoins ont été sélectionnés aléatoirement parmi la population générale (n=131 469). Au final, il n'a pas été observé d'excès de risque d'infarctus du myocarde parmi les conducteurs de métro plus particulièrement exposés aux polluants des enceintes souterraines de transport ferroviaire (Bigert et al., 2007).



## Des actions mises en place

### Expertise et recommandations

Aucune réglementation spécifique ne porte sur la qualité de l'air dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire<sup>(6)</sup>. Néanmoins, les pouvoirs publics se sont emparés de cette problématique depuis plusieurs années. La Direction générale de la santé (DGS) a saisi le CSHPF en 2000, notamment pour évaluer la possibilité de fixer des valeurs guides. Un premier avis a été rendu en 2000, décidant de la création d'un groupe de travail pluridisciplinaire (CSHPF, 2000), puis un second avis en 2001 (CSHPF, avril 2001), comportant un certain nombre de recommandations visant à améliorer les connaissances sur cette problématique. Cet avis proposait notamment que les résultats des études et de la stratégie de surveillance des exploitants fassent l'objet d'un rapport annuel présenté au CSHPF. Ce dernier a par ailleurs recommandé une valeur de référence de la qualité de l'air intérieur dans ces enceintes (cf. encadré 6). Puis, l'analyse des rapports transmis par les exploitants, à savoir la SNCF et la RATP, a donné lieu à de nouvelles recommandations du CSHPF portant essentiellement sur l'approfondissement des connaissances (CSHPF, 2003 et 2005). En 2006, un nouvel avis du CSHPF portait sur les actions à mettre en œuvre, il recommandait d'adopter un plan d'action de réduction des concentrations particulières, de réduire les émissions à la source (matériaux de roulage, de freinage et d'aménagement des voies), d'optimiser les dispositifs de ventilation et de filtration et d'encourager l'équipement de rames avec ventilation réfrigérée (CSHPF, 2006b).

Suite à une saisine de la DGS, l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses) met en place actuellement un groupe de travail « Pollution chimique de l'air des enceintes souterraines de transport ferroviaire et risques sanitaires associés chez les travailleurs »<sup>(7)</sup>.

### Actions de la RATP et de la SNCF

Différentes mesures de gestion ont été mises en place par la RATP et la SNCF afin de réduire les

niveaux de polluants dans leurs enceintes souterraines. Ces actions portent essentiellement sur les sources et la ventilation mais aussi sur des techniques d'épuration ou de filtration de l'air.

La gestion des sources repose principalement sur le renouvellement du matériel roulant et l'amélioration et la généralisation du freinage électrique car les frottements engendrés au moment du freinage mécanique classique par friction ont été identifiés comme une source prépondérante de particules. Dans le cadre du premier Plan de protection de l'atmosphère de la région Île-de-France (2005-2010), la RATP s'est ainsi engagée à généraliser et maximiser l'utilisation du freinage électrique des rames de métro et RER. Par ailleurs, des actions de formation des conducteurs de rames portent sur un mode de « conduite souple », ce qui peut permettre une diminution de l'utilisation du freinage, avec toutefois des contraintes liées à la cadence des trains.

L'optimisation de la ventilation des enceintes constitue un autre levier important. Depuis 2006, les portes d'accès aux stations sont en permanence ouvertes, ce qui permet une amélioration du renouvellement de l'air, amélioration toutefois difficile à évaluer du fait d'une mise en place très progressive. Si le dimensionnement des systèmes de ventilation est limité par des contraintes de taille des ouvrages et de nuisances potentielles pour les riverains, en termes de bruit notamment, il est toutefois possible de les optimiser. A ce titre, les exploitants ont réalisé des essais afin d'évaluer l'efficacité des ventilateurs et de leurs modes de fonctionnement sur la diminution des niveaux de polluants. Comme le souligne le CSHPF dans son rapport, malgré quelques résultats chiffrés, il est difficile d'objectiver l'efficacité réelle des différentes solutions envisagées (CSHPF, 2006a). Toutefois, le renouvellement des ventilateurs devrait améliorer la capacité d'extraction des dispositifs d'aération mais cela nécessite de lourds investissements.

Par ailleurs, dans le cadre de la construction de nouvelles infrastructures, la RATP et la SNCF ont

(6) en dehors du code du travail qui s'applique pour les travailleurs

(7) Le CSHPF n'existe plus aujourd'hui, l'Anses a repris une partie de ses attributions.



d'ores et déjà intégré dans leurs cahiers des charges des critères de qualité de l'air, en particulier dans le dimensionnement des ouvrages de ventilation des futures gares souterraines.

Les exploitants ont également envisagé des systèmes de traitement de l'air, notamment des solutions techniques permettant l'élimination des particules, en particulier l'utilisation de trains « laveurs », de trains « aspirateurs » ou le chaulage. L'impact de ces techniques sur les niveaux de polluants apparaît toutefois variable, et relativement faible. Des solutions plus anecdotiques, telles que l'implantation d'un mur

végétal aux propriétés purificatrices, ont également été mises en œuvre. Concernant l'air à l'intérieur des rames, des systèmes de filtration de l'air entrant peuvent être envisagés sur certaines rames. Le dimensionnement de ces systèmes est cependant contraint par des limites d'encombrement à l'intérieur des rames (au détriment de l'espace réservé aux voyageurs), ainsi que par la nécessité de ne pas accentuer le poids des rames qui pourrait avoir un retentissement sur le freinage, favorisant ainsi l'émission de particules.

## Conclusion

Les enceintes souterraines de transport ferroviaire sont caractérisées par des niveaux de particules particulièrement élevés, or ces réseaux, notamment en Île-de-France, sont fréquentés par une large population ainsi exposée à cette pollution. La surveillance a toutefois révélé une variabilité importante des niveaux de polluants selon les lignes de transport considérées et la localisation au sein des enceintes (quais, salles d'échanges, matériels roulants...). Ainsi, il n'est pas aisé d'établir un profil type d'exposition, d'autant plus que les comportements des voyageurs (temps de parcours, lignes empruntées) sont très variables.

Par ailleurs, si la nocivité des particules atmosphériques ambiantes est aujourd'hui reconnue, les constituants spécifiques mis en cause ne sont pas clairement identifiés. Alors que les profils de composition des particules retrouvées dans les enceintes ferroviaires souterraines sont sensiblement différents de ceux établis en milieu extérieur, le risque sanitaire potentiel lié à ces expositions reste à évaluer spécifiquement. Les premiers éléments disponibles n'ont pas permis de mettre en évidence un risque à court terme bien que des effets biologiques spécifiques aient été relevés. Les travaux de recherche doivent se poursuivre afin notamment de mieux comprendre le potentiel toxique des particules relevées dans ces milieux et d'évaluer les éventuels risques à

plus long terme d'une exposition chronique à ces polluants. Par ailleurs, la plupart des évaluations ont été menées chez les travailleurs. Ces résultats ne peuvent pas être directement transposés à la population générale qui comporte des individus plus sensibles tels que les enfants, les personnes âgées, les malades chroniques.

Compte-tenu de ces incertitudes, l'amélioration de la qualité de l'air des enceintes souterraines est fortement encouragée par les pouvoirs publics et constitue une préoccupation des exploitants. Ces derniers ont mené, et mènent encore, de nombreuses actions qui ont permis d'améliorer les connaissances et d'explorer un éventail de solutions techniques pour limiter la pollution particulaire. Les résultats de ces travaux, pour la plupart, ne sont pas rendus publics. La modernisation du matériel et des infrastructures apparaît prometteuse et doit être poursuivie. Il ressort par ailleurs que, parmi les différentes stratégies possibles d'amélioration de la qualité de l'air, certaines sont contraintes par l'implantation et le dimensionnement des ouvrages existants. En revanche, dans la perspective de la construction de nouvelles infrastructures, notamment dans le cadre du futur réseau de transport du Grand Paris, l'opportunité est donnée d'intégrer la problématique de la qualité de l'air dès la conception.

## Références

- Aarnio P et al. The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM2.5) in the Helsinki subway system. *Atmospheric Environment*, 2005 ; 39 : 5059-5066.
- Air Breizh et . Étude de la qualité de l'air dans le métro rennais. 2005. 29 p.
- Airparif et RATP. Campagne de mesure à la Gare de RER Auber. 2010, 65 p.
- Airparif et RATP. Campagne de mesure à la station de métro Faiherbe-Chaligny : impact de l'air extérieur sur les niveaux de pollution atmosphérique intérieurs. 2009, 69 p.
- Airparif. La qualité de l'air en Île-de-France en 2010. 2011a, 100 p.
- Airparif. Origine des particules en Île-de-France. 2011b, 172 p.
- Atmo Nord-Pas de Calais et Transpole. Étude de la qualité de l'air dans les stations du métro lillois. 2008.
- Atmo Paca et RTM. Surveillance de la qualité de l'air dans le métro de Marseille. 2011, 64 p.
- Bachoual R et al. Biological effects of particles from the Paris subway system. *Chem. Res. Toxicol.*, 2007 ; 20 : 1426-33.
- Bigert C et al. No short-term respiratory effects among particle-exposed employees in the Stockholm subway. *Scand. J. Work Environ. Health*, 2011 ; 37 : 129-35.
- Bigert C et al. Blood markers of inflammation and coagulation and exposure to airborne particles in employees in the Stockholm underground. *Occup. Environ. Med.*, 2008 ; 65 : 655-8.
- Bigert C et al. Myocardial infarction in swedish subway drivers. *Scand. J. Work Environ. Health*, 2007 ; 33 : 267-71.
- Brook RD et al. Insights into the mechanisms and mediators of the effects of air pollution exposure on blood pressure and vascular function in healthy humans. *Hypertension*, 2009 ; 54 : 659-67.
- Campagna D et al. Analyse de la mortalité des agents et ex-agents de la RATP sur la période 1980-1999 - Cohorte Edgar. 2008, 24 p.
- Campagna D et al. Santé respiratoire des salariés de la RATP travaillant dans les enceintes ferroviaires souterraines. 2010, rapport 67 p et synthèse 17 p.
- Coparly. Étude préliminaire de la qualité de l'air dans le métro lyonnais (21 octobre – 6 novembre 2002). 2003, 66 p.
- CSHPF. Section des milieux de vie. Qualité de l'air dans les modes de transport terrestres. Rapport du groupe de travail « air et transports », Editions Tec & Doc, sept. 2006a, 162 p.
- CSHPF. Section des milieux de vie. Avis relatif à la qualité de l'air dans les modes de transport. 2006b.
- CSHPF. Section des milieux de vie. Avis relatif à de nouvelles recommandations aux exploitants de réseaux ferroviaires souterrains concernant la caractérisation de la pollution atmosphérique dans leurs enceintes, s'agissant plus particulièrement de la SNCF / de la RATP. 8 juil. 2003 et 12 mai 2005.
- CSHPF. Section des milieux de vie. Avis relatif à l'élaboration de valeurs guides de qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines. 3 mai 2001.
- CSHPF. Section des milieux de vie. Avis relatif à la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines. 10 oct. 2000 et 5 avr. 2001.
- Delaunay C et al. Évaluation de l'exposition des citadins aux polluants atmosphériques au cours de leurs déplacements dans l'agglomération parisienne. 2010, 132 p.
- Dockery DW. Health effects of particulate air pollution. *Ann. Epidemiol.*, 2009 ; 19 : 257-63.
- Fortain A. Caractérisation des particules en gares souterraines. Thèse, spécialité Génie civil et sciences de l'habitat, Université de La Rochelle, juin 2008, 224 p.
- Grass DS et al. Airborne particulate metals in the New York city subway: a pilot study to assess the potential for health impacts. *Environ. Res.*, 2010 ; 110 : 1-11.
- Gustavsson P et al. Incidence of lung cancer among subway drivers in Stockholm. *Am. J. Ind. Med.*, 2008 ; 51 : 545-7.
- INRS. Site internet, consulté en avril 2012 : [www.inrs.fr/accueil/accidents-maladies/maladie-professionnelle/maladie-respiratoire/pneumoconioses.html](http://www.inrs.fr/accueil/accidents-maladies/maladie-professionnelle/maladie-respiratoire/pneumoconioses.html)
- Karlsson HL et al. Mechanisms related to the genotoxicity of particles in the subway and from other sources. *Chem. Res. Toxicol.*, 2008 ; 21 : 726-31.
- Karlsson HL et al. Comparison of genotoxic and inflammatory effects of particles generated by wood combustion, a road simulator and collected from street and subway. *Toxicol. Lett.*, 2006 ; 165 : 203-11.
- Karlsson HL et al. Subway particles are more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cells. *Chem. Res. Toxicol.*, 2005 ; 18 : 19-23.
- Klepczynska Nystrom A et al. Health effects of a subway environment in healthy volunteers. *Eur. Respir. J.*, 2010 ; 36 : 240-8.
- Klepczynska Nystrom A et al. Health effects of a subway environment in mild asthmatic volunteers. *Respir Med*, 2012 ; 106 : 25-33.
- Marano F et al. Impacts des particules atmosphériques sur la santé : aspects toxicologiques. *Environnement, Risques & Santé*, 2004 ; 3 : 87-96.
- Omnil. Les transports en commun en chiffres 2000-2009. Juin 2011.
- OQAI. Campagne nationale logements - État de la qualité de l'air dans les logements français - Rapport final. 2006, 165 p.
- Oramip. Étude de l'air intérieur dans le métro ligne B - année 2010. 2010, 6 p.
- Palmer et al. Exposure to metal fume and infectious pneumonia. *Am. J. Epidemiol.* 2003 ; 157 : 227-33.
- RATP. Squales - Données et Bilan 2010, [www.ratp.fr/ratp/r\\_6167/la-qualite-de-lair-dans-les-espaces-souterrains](http://www.ratp.fr/ratp/r_6167/la-qualite-de-lair-dans-les-espaces-souterrains)
- Ripanucci G et al. Dust in the underground railway tunnels of an italian town. *J. Occup. Environ. Hyg.*, 2006 ; 3 : 16-25.
- Seaton A et al. The London Underground : dust and hazards to health. *Occup. Environ. Med.*, 2005 ; 62 : 355-62.
- Stif. Plan de déplacements urbains d'Île-de-France. Projet proposé par le conseil du Stif par délibération du 09/02/11. 239 p.

**O b s e r v a t o i r e   r é g i o n a l   d e   s a n t é   Î l e - d e - F r a n c e**

43, RUE BEAUBOURG 75003 PARIS - TÉL : 01 77 49 78 60 - FAX : 01 77 49 78 61  
e - m a i l : [ors-idf@ors-idf.org](mailto:ors-idf@ors-idf.org) - Site internet : [www.ors-idf.org](http://www.ors-idf.org)

Directrice de publication : Dr Nathalie SENECAL

L'ORS Île-de-France, département autonome de l'IAU Île-de-France,  
est un observatoire scientifique indépendant financé par  
l'Agence régionale de santé d'Île-de-France et le Conseil régional d'Île-de-France

