

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**QUALITE DE L'AIR DES ENCEINTES DE TRAITEMENT
DE DECHETS ET DES ENCEINTES DE TRANSPORT
FERROVIAIRE SOUTERRAINES
ETAT DES CONNAISSANCES ET AXES D'AMELIORATION**

***AIR QUALITY IN WASTE TREATMENT PLANTS AND IN
UNDERGROUND RAILWAY OR SUBWAY SYSTEMS
STATE OF KNOWLEDGE AND WAYS OF IMPROVEMENTS***

juillet 2016

S. TRAVERSE, S. DERIEN – BURGEAP
A. GINESTET – CETIAT



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Qualité de l'air des enceintes de traitement de déchets et des enceintes de transport ferroviaire souterraines. Etat des connaissances et axes d'amélioration, 2016, 226 p, n°14-0244/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2016

RESUME

L'exposition des populations à la pollution de l'air est une préoccupation grandissante tant vis-à-vis de l'air atmosphérique qu'au sein de l'habitat, des lieux de travail ou de transport. L'association RECORD a souhaité s'intéresser plus particulièrement à la qualité de l'air des enceintes de traitement de déchets en lien avec l'exposition des travailleurs et des enceintes souterraines de transport ferroviaire en lien avec l'exposition de la population générale.

La mission confiée au groupement BURGEAP-CETIAT, conduite en 2014 – 2016, a tout d'abord consisté à réaliser un état des connaissances sur les polluants et les niveaux de pollution présents dans ces enceintes puis à rechercher les axes d'amélioration pouvant être envisagés. Le présent document rend compte de cette mission.

Pour les enceintes de traitement de déchets (centres de tri, centres de compostage /méthanisation et usines d'incinération),

- les polluants et les niveaux de concentrations sont aujourd'hui relativement bien connus sans que le lien soit clairement établi entre les systèmes de gestion des émissions ou de réduction des concentrations et les niveaux de concentration ;
- les axes d'amélioration identifiés sont d'ordre technique et méthodologique. Les axes techniques d'amélioration reprennent globalement les recommandations formulées par l'INRS et la CARSAT pour chaque filière. Il a également été identifié des axes organisationnels et méthodologiques reposant sur une appréhension et une communication des besoins par les différents acteurs (maître d'ouvrage, constructeur et équipes de conception, et exploitant) permettant de mettre en cohérence la construction et l'exploitation vis-à-vis de l'objectif de l'amélioration de la qualité de l'air des enceintes.

Pour les enceintes de transport ferroviaire souterrain,

- les polluants et des niveaux de concentrations ont fait l'objet de nombreuses études ces dernières années tant en France qu'à l'étranger. Il ressort que les déterminants de la qualité de l'air de ces enceintes sont les émissions de particules métalliques liées au matériel roulant (freinage majoritairement, contact roue-rail, caténaire et pantographe) et le transfert vers les populations présentes sur les quais lié aux surpressions lors des passages de trains ;
- les axes d'amélioration de la qualité de l'air identifiés sont d'ordre technique structurés autour de la réduction des émissions à la source, la limitation des transferts (actions sur l'aéraulique - dont la ventilation- ou l'aménagement des stations) et dans une moindre mesure la réduction des concentrations par la ventilation ou le traitement de l'air. Ces éléments sont à intégrer lors des consultations (matériel roulant) et études de conception (limitation des émissions et des transferts) pour les nouvelles lignes ou stations. Pour les enceintes existantes, les possibilités d'amélioration de la qualité de l'air dépendent des enceintes (géométries, ventilation, aéraulique) et du matériel utilisé.

Si les axes d'amélioration énoncés ci-dessus peuvent être envisagés pour toute nouvelle construction d'enceintes de traitement de déchets ou de transport ferroviaire souterrain, leur pertinence par rapport à des sites exploités est fortement dépendante :

- i. des enceintes (géométries, équipement de ventilation),
- ii. des sources de dégradation de la qualité de l'air (composition des déchets et procédés de traitement ou matériel et système d'exploitation) et
- iii. de l'écoulement et du transport des polluants dans l'air.

L'étude de la pertinence des moyens d'amélioration doit alors reposer sur une bonne connaissance et compréhension des écoulements, du transport des polluants et des concentrations au sein de ces enceintes.

MOTS CLES

Enceintes de transport ferroviaire souterrain, enceintes de traitement de déchet, qualité de l'air, pollution gazeuse et particulaire, bioaérosols, ventilation

SUMMARY

The exposure of people to the outdoor air pollution as well as to the indoor air pollution (at home, in workplaces, in transport) is a growing concern. RECORD association has decided to study more specifically the air quality, and the exposure of the general population to the air pollution, in waste treatment plants as well as in underground railway and subway systems.

RECORD association has ordered the BURGEAP-CETIAT consortium in 2014 and the study has been carried out in 2016. It has first consisted in to make a review of the existing data regarding air pollutants (type and concentration) in the considered premises then the ways of improvements of the indoor air quality have been studied. This report represents the final deliverable of this study.

For the waste treatment plants (waste sorting units, waste composting units, methanation plants, waste incineration units) :

- The type of pollutants and their respective concentrations in indoor air are today well known but there is not clear relationship between concentrations and both the emissions and the ways to reduce them.
- There are two kinds of identified ways of improvement: technological and methodological. The technical ways of improvements correspond to the recommendations provided by INRS. From the methodological point of view, it has been identified a need of a better communication between all the stakeholders (project manager, designer, constructor and owner) in order to make the design and the operation of the waste treatment plants consistent with the desired indoor air quality.

For the underground railway and subway systems:

- There is a lot of studies in France and around the world in recent years. The main conclusion is that there are relationships between the air quality within underground railway and subway systems and the emission of fine metallic particles emitted by the moving trains (friction in brakes, the contact between the wheels and the rails, contact with overhead wires and pantographs); these fine particles are transferred to people by the overpressure which is due to the motion of the trains within the tunnels.
- Ways of improvement of the indoor air quality exist: reduction of the pollution at the source, limitation of the transfers from the most polluted zones to the least polluted zones and dilution of the pollution with ventilation. For new lines and/or stations, these ways of improvements have to be taken into account at the design stage. For the existing systems the ways of improvement depend on the system itself (geometry, ventilation,) and on the equipment in use.

The ways of improvement listed above can be considered for new constructions, their relevance regarding the existing systems depends on :

- i. the system itself (geometry and ventilation).
- ii. the sources of deterioration of the indoor air quality (composition of wastes, waste treatment, operating system).
- iii. air flows and pollutants transport.

A good knowledge and a good understanding of the air flows and of the pollutants transport is necessary to well design any new system listed as a way of improvement.

KEYWORDS

Underground railway systems, waste treatment plants, air quality, particulate and gaseous pollutants, bioaerosols, ventilation

Introduction

L'exposition des populations à la pollution de l'air est une préoccupation grandissante tant vis-à-vis de l'air atmosphérique qu'au sein de l'habitat, des lieux de travail ou de transport. L'association RECORD a souhaité s'intéresser plus particulièrement à la qualité de l'air des enceintes de traitement de déchets en lien avec l'exposition des travailleurs et des enceintes souterraines de transport ferroviaire en lien avec l'exposition de la population générale.

L'étude a été réalisée à partir d'une bibliographie nationale et internationale (finalisée au printemps 2015) d'une part et la conduite d'une quinzaine d'entretiens essentiellement auprès des acteurs du traitement de déchet d'autre part.

La synthèse par type d'enceintes étudié est présentée ci-après.

Les spécificités de l'étude des enceintes fermées ou semi-ouvertes de type enceintes de traitement de déchets ou de transport ferroviaire souterrain reposent d'une part sur les populations concernées et le cadre réglementaire qui leur est propre. Dans les enceintes de traitement de déchets, les populations ciblées sont les travailleurs auxquels s'applique le code du travail tandis que dans les enceintes de transport ferroviaire souterrain, l'étude menée s'intéresse aux usagers.

D'autre part, la qualité de l'air de ces enceintes est liée aux sources (polluants, conditions d'émissions) et aux conditions de ventilation, conduisant à des recommandations spécifiques qui ne peuvent être généralisées à tout type d'enceinte.

Parmi les axes d'amélioration proposés, ceux qui ne sont pas spécifiques aux sources de pollution des enceintes étudiées, sont généralisables à tout type d'enceintes fermées et semi-ouvertes où des sources internes de dégradation de la qualité de l'air existent. Les recommandations portent sur l'ensemble des phases de la construction et de l'exploitation où l'enjeu de la qualité de l'air doit être considéré pour in fine conduire à son amélioration. Elles reposent sur l'organisation projet, la communication, la consultation et contractualisation des différents marchés...

Enfin, les recommandations formulées sur le dimensionnement des diagnostics pouvant être menés en fonction des objectifs (évaluer des expositions, comprendre ou remédier à une situation dégradée...) et le recours à des outils de modélisation pour le dimensionnement, la conception et la remédiation s'appliquent également à tout type d'enceintes fermées et semi-ouvertes.

Distinction entre construction et exploitation

Si les axes d'amélioration énoncés précédemment peuvent être envisagés pour toute nouvelle construction d'enceinte de transport ferroviaire souterrain, leur pertinence par rapport à des sites exploités est fortement dépendante i) des enceintes (géométries, équipement de ventilation), ii) des sources de dégradation de la qualité de l'air et iii) de l'écoulement et du transport des polluants dans l'air. L'étude de la pertinence des moyens d'amélioration doit reposer sur une bonne connaissance et compréhension des écoulements, du transport des polluants et des concentrations au sein de ces enceintes.

La réalisation de diagnostics portant sur les concentrations, la ventilation, les paramètres de confort est alors nécessaire. Leur interprétation peut nécessiter le recours à des outils de modélisation. La modélisation est alors non seulement un outil d'aide à l'interprétation mais également un outil prospectif visant à étudier les solutions de remédiations possibles. Dans la mesure où la modélisation est nécessairement une simplification de la réalité, la conduite d'études pilotes permettant d'asseoir l'efficacité des mesures de gestion envisagées est fortement recommandée.

Introduction

The exposure of people to the outdoor air pollution as well as to the indoor air pollution (at home, in workplaces, in transport) is a growing concern. RECORD association has decided to study more specifically the air quality, and the exposure to the air pollution, in waste treatment plants as well as in underground railway and subway systems.

The study has been carried out on the basis of a French and international review (completed in spring 2015) along with no less than 15 interviews with experts in the field of waste handling.

The synthesis for each type of the studied premises is presented here after.

The specificities of the study of the closed or semi-open premises in waste treatment plants as well as in underground railway and subway systems is based on the people concerned and their own regulatory framework. In the units of waste treatment plants the people concerned are the workers for who the French labor code applies while in underground railway and subway systems the study concerns the users.

The indoor air quality of the studied premises is mainly influenced by the sources (pollutants, sources) and the ventilation conditions which means that the specific recommendations cannot be applied to other types of premises.

Among the ways of improvement proposed in this report, those which are not specific to the pollution sources of the studied premises can be applied to any other type of closed or semi-open premises where sources of indoor air deterioration exist. Recommendations deal with all steps of building and operation stages when the challenge of the air quality has to be considered in the sense it has to be improved. Recommendations deals with project management, communication, consultation and establishment of a contract for the different markets.

Finally, the recommendations based on the sizing of the diagnostics which can be done as function of the objectives (to assess the exposition, to understand and to repair a degraded situation,...) and the use of modeling tools for the sizing, the design and remediation can be applied to any type of closed or semi-open premises.

Differences between construction and exploitation

All the ways of improvement described above can be considered for the design of new underground railway and subway systems. But for the existing systems the relevance of the ways of improvement depends on i) the premises (geometry, existing ventilation system), ii) the pollutants emission sources characteristics and iii) the pollutants flow pattern.

As a consequence, the study of the relevance of the ways of improvement has to be based on the knowledge and the understanding of the flows, the pollutants transport and pollutants concentrations within the premises. It is then necessary to perform diagnostics on concentrations, ventilation and comfort parameters. Modeling tools can be useful to understand an existing degraded situation and can also be used to study the design of new construction.

As far as modeling requires simplifications and transport pollution is complicated in those premises, for existing units where a degraded situation have to be managed, it is necessary before the implementation of systems or devices to carry out a pilot stage in order to validate the choice of a new solution.

Pour les nouvelles constructions d'enceintes, il est recommandé lors des études de conception le recours à des outils de modélisation permettant, vis-à-vis de la qualité de l'air, l'optimisation de la construction en lien avec l'exploitation qui en sera faite.

Pour les enceintes de traitement de déchets (centres de tri de déchets recyclables, centres de compostage /méthanisation et usines d'incinération)

Polluants majoritaires

La revue bibliographique conduite met en lumière que l'identification des principaux polluants par type de site et par niveau d'enceinte est une tâche complexe, les paramètres influents étant nombreux (matière première collectée, délai entre la collecte et le traitement, activité dans les halls, ...). Les polluants majoritaires suivants ont été listés :

- Compostage / méthanisation : poussières, bioaérosols et ammoniac ;
- Tri de déchets recyclables : poussières et bioaérosols ;
- Incinération : poussières, bioaérosols et métaux.

Il est à noter que les lieux et périodes d'exposition à ces polluants sont spécifiques à chaque enceinte et que, pour l'ensemble de ces sites, les opérations d'entretien et de maintenance génèrent un niveau d'exposition plus élevé, notamment du fait de la remise en suspension des particules déposées sur les surfaces.

Si la qualité de l'air des usines de compostage est aujourd'hui bien documentée, la littérature est globalement plus rare sur les autres types de sites.

La qualité de l'air des différents sites de traitement de déchets est bien documentée. Cependant, la poursuite des investigations permettant une meilleure connaissance de la qualité de l'air de ces enceintes fermées et semi-ouvertes et in fine de l'évaluation des expositions des travailleurs reste pertinente en vue de son amélioration. De telles études devront en particulier cibler :

- les bioaérosols. La bibliographie est conséquente sur le sujet, mais la multitude de bioaérosols ayant des effets toxiques parfois spécifiques rend complexe la conduite de mesures et leur interprétation ;
- les particules diesel en lien avec les engins utilisés dans ces enceintes. En effet, lors de la présente étude, aucune donnée spécifique à l'exposition des travailleurs aux particules diesel n'a été recensée.

La ventilation de ces enceintes

Dans la stratégie générale de réduction des risques liés à la pollution de l'air sur les lieux de travail, la réglementation stipule que la réduction des concentrations par la ventilation générale n'est à considérer qu'après la réduction des émissions, la captation des polluants au plus près de la source (assainissement local de l'air).

Les enceintes recevant des déchets sont considérées comme des lieux à pollution spécifique pour lesquels le code du travail donne des débits minimums d'air neuf en cas de ventilation mécanique (article R4222-6) qu'il convient, suivant la réglementation, d'adapter à la nature et à la quantité des polluants. Cette ventilation doit permettre que les expositions des travailleurs soient inférieures aux valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP) (article R4222-13).

Les informations disponibles dans la littérature sur la ventilation des enceintes recevant des déchets concernent essentiellement les cabines de tri, qui sont les lieux où les

For the design of a new construction, the use of air quality modeling tools are recommended to improve the future air quality.

Waste treatment premises (Recyclable waste sorting units, waste composting units, methanation plants, waste incineration units)

Main pollutants

The review which has been carried out shows that the identification of the main pollutants for each site is difficult because there are numerous influent parameters (collected raw material, delay between collection and treatment of the waste, activity within the shops,...). However the major pollutants have been listed:

- *Composting/methanation: dust, bioaerosols and ammoniac;*
- *Recyclable waste sorting: dust and bioaerosols;*
- *Incineration: dust, bioaerosols and metals.*

It has to be pointed out that places and time of exposition to these pollutants are specific to each type of premises and that maintenance activities are responsible of higher exposure level due to the fact that particles previously deposited on surfaces are re-suspended in the air.

If today the indoor air quality of waste composting units is well documented, data are scarce for the other types of units.

The indoor air quality of the handling waste premises is well documented. However, it is necessary to continue to investigate this issue for a better knowledge of the air quality and, finally, the assessment of the workers exposure in order to improve it. Studies to be carried out have to focus on:

- *Bioaerosols. There are a lot of data in the literature but because the variety of bioaerosols is huge and their toxic effects too? Thus it appears difficult to measure and interpret the bioaerosol exposure.*
- *Diesel particles in relation with vehicles used within these premises. During this study, no data regarding the exposure of workers to diesel particles has been identified in the literature.*

Ventilation

In the general reduction strategy of the risks associated to the exposure of air pollution in work places, the regulation requires that the decrease of the pollutant concentration with general ventilation has to be considered only after emissions reduction and pollutants capture as close as possible to the sources (local ventilation).

Premises receiving wastes are considered as specific pollution places for which the labor code requires minimum fresh air flow values in case of mechanical ventilation (article R4222-6); these values have to be corrected in case of specific regulations for some specific pollutants. The ventilation is intended to ensure that the exposure of the workers is lower than the defined occupational exposure limit values (article R4222-13).

The information available in the literature regarding the ventilation of the premises dealing wastes concern mainly sorting cabins which are work places where workers are closed to the wastes. For the other premises, few information are available. Common sense as well as the use of a traditional approach for the cleaning of the air of

travailleurs sont en travail posté à proximité des déchets. Pour les autres lieux, peu d'informations sont disponibles. Le bon sens et l'application d'une démarche classique d'assainissement de l'air des locaux de travail amène à la prise en compte des points suivants pour la conception de la ventilation :

- séparer physiquement les différentes zones auxquelles sont dédiées des ventilations spécifiques ; il s'agit en particulier de ne pas recycler l'air provenant d'une zone à pollution spécifique vers une zone où la pollution de l'air n'est pas la même, que ces autres locaux soient à pollution spécifique ou non ;
- éviter les zones de stagnation des polluants (zones mortes et accumulation en partie haute de locaux) ;
- respecter les exigences de la réglementation : débit d'air neuf réglementaire auquel s'ajoutent les débits d'air liés à la compensation et le respect des VLEP ;
- traiter l'air rejeté à l'extérieur pour réduire les nuisances pour les populations riveraines.

Les axes d'amélioration

L'amélioration de la qualité de l'air et in fine de l'exposition des travailleurs dans les enceintes de traitement des déchets nécessite d'agir sur plusieurs axes. Les axes d'amélioration techniques issus en majorité des recommandations de l'INRS et de la CARSAT sont présentés dans le rapport. A cela s'ajoutent des recommandations organisationnelles, de contractualisation ou de sensibilisation portant à la fois sur la construction et l'exploitation des enceintes. Ces recommandations portent sur les étapes de définition du besoin, le cahier des charges, le marché de construction et exploitation, les études de conception, la construction, la réception et livraison et enfin l'exploitation.

- **Dans la conception des marchés**, la qualité de l'air étant un résultat couplé de la construction et de l'exploitation, de façon à impliquer au plus tôt l'exploitant et permettre de lisser les investissements potentiellement nécessaires à l'amélioration de la qualité de l'air, il est recommandé d'envisager des marchés longs (10 ans) couplant conception et exploitation.
- **Dans les cahiers des charges**, il est recommandé de sensibiliser les donneurs d'ordre aux enjeux de la qualité de l'air à la fois pour la construction et l'exploitation. Pour la construction, cette sensibilisation est associée à la recommandation de retranscrire, dans les cahiers des charges et dans les critères de jugement des offres, les attendus d'une conception où la ventilation est une partie intégrante du process dans un objectif d'amélioration de la qualité de l'air.
- **La réception et le début de l'exploitation**. Les essais de réception et performance et la transmission effective à l'exploitant des dossiers d'installation, des consignes d'exploitation et du manuel d'exploitation sont des éléments structurants. La clarification des attendus (objectifs et contenu) au moment de la contractualisation est recommandée ainsi que l'investissement technique à la fois du constructeur et de l'exploitant lors de la réception de l'installation et la mise en service industrielle.
- **Durant l'exploitation**, l'impact des conditions d'exploitation est déterminant sur la qualité de l'air. L'entretien régulier portant sur le nettoyage du site, l'entretien et la maintenance des équipements de process et de ventilation contribue à l'amélioration de la qualité de l'air. Promouvoir un entretien et une maintenance adaptés nécessite la sensibilisation et la formation des exploitants et du personnel de maintenance ainsi que la formalisation des attendus (manuel d'exploitation, passation de contrat de maintenance). Les développements

the work places leads to the consideration of the following points for the design of the ventilation:

- *To physically separate the different zones in which specific ventilation is set; in particular it means that it should be avoided to recirculate the air coming from a zone at specific pollution to zones where the air pollution is different, these zones being at specific pollution or not;*
- *To avoid to create zones with pollutants stagnation (dead zones and build-up in the upper parts of the premises);*
- *To meet the requirements of the regulation: minimum fresh air flows plus the compensation air flows plus the air flows necessary to decrease the pollutant concentrations down to the occupational exposure limit values;*
- *To treat the air exhausted to outdoors in order to limit nuisances to the neighborhood.*

Ways of improvement

The enhancement of the air quality and finally the decrease of the workers exposure in the premises of wastes handling need to act on several lines. The ways of technical improvement mainly come from the recommendations given by the French institute INRS and the CARSAT and are presented in this report. We also consider the recommendations dealing with the organization and sensitization point of view. These recommendations deal with the expression of the needs, the specifications, studies for design, construction, reception, delivery and operation:

- ***In the design of contract***, the air quality being the result of both construction and exploitation, it is recommended to develop contract over long periods (10 years) that concern at the same time design, construction and exploitation. As a consequence, the operator will be more involved and the investments necessary to increase the air quality will be more easily amortized over the period considered
- ***In the definition of the specifications***, it is recommended to verify that the principal is aware of the issues of the air quality for both construction and exploitation. For construction, it is recommended to ensure that ventilation is taken into account for the air quality enhancement.
- ***Reception and beginning of the operation***. Testing at the reception for performance assessment as well as the transfer to the owner of i) the installation folder, ii) the operational directives and iii) the operations manual are structuring elements. The clear expression of the objectives and the means is recommended during the contract. The technical investment of the constructor and the owner at the reception and the commissioning of the installation is also required.
- ***During operation***, the impact of the conditions of operation on the air quality is determinant. Maintenance and cleaning of the ventilation installation contributes to the enhancement of the air quality. In order to promote suitable cleaning and maintenance it is necessary to sensitize and to train people in charge of operation and maintenance. The development of enhanced computer-assisted management as well as visual indicator in the premises goes along this line.

de systèmes de gestion assistée par ordinateur (GMAO) et d'indicateurs visuels dans les enceintes vont dans ce sens.

Pour les enceintes de transport ferroviaire souterrain

Polluants majoritaires

A partir des années 2000, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) a rendu plusieurs avis relatifs à la qualité de l'air dans les enceintes de transport souterraines recommandant de développer la surveillance de la qualité de l'air. Ces textes ont conduit dans plusieurs réseaux de transport aux mesures des concentrations en PM10, en HAM (hydrocarbures aromatiques monocycliques), NO2 (dioxyde d'azote), avec pour les PM10 une caractérisation des teneurs en métaux (fer, nickel, chrome, manganèse, plomb, cadmium), en silice cristalline, en fibres et en HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques).

De nombreuses données récentes sont disponibles pour les particules en particulier. L'ensemble des auteurs s'accordent à considérer la pollution particulaire comme le déterminant de la qualité de l'air de ces enceintes. L'origine de la pollution particulaire métallique est liée à l'exploitation et au matériel roulant (freinage pour 70% des émissions, contact roue-rail pour 30%, caténaire et pantographe pour moins de 1%). Actuellement la connaissance de ces émissions est très parcellaire, tant au plan national qu'international.

La ventilation de ces enceintes

Pour la ventilation, des exigences existent pour le désenfumage des tunnels ((Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2011), (JORF, 2007) et (JORF, 2005)) et la valeur minimum de débit d'air neuf est de 0,36 m³/h/m² pour les enceintes souterraines considérées comme des locaux à présence épisodique (JORF, 1978).

La ventilation des gares souterraines est complexe dans le sens où elle est le résultat d'une action naturelle (provoquée par les différences de pression et de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur) et d'une action mécanique (extraction et/ou introduction d'air neuf en tunnel et/ou en station, et effet piston lors des entrées et sorties des trains des tunnels). Par ailleurs, dans un réseau de transport dense, de multiples connexions existent avec pour conséquence de créer une aéraulique très complexe. Les données relatives au taux de renouvellement d'air des enceintes sont ainsi très parcellaires.

Du point de vue des transferts, la bibliographie réalisée montre que le rôle joué par la sortie de tunnel et l'arrivée en station des trains est majeur dans la dégradation de la qualité de l'air des stations, les particules étant transportées par l'effet piston créé.

Axes d'amélioration

Les axes d'amélioration de la qualité de l'air identifiés sont d'ordre technique, structurés autour de la réduction des émissions à la source, la limitation des transferts (actions sur l'aéraulique - dont la ventilation- ou l'aménagement des stations) et dans une moindre mesure la réduction des concentrations par la ventilation ou le traitement de l'air. Ces éléments sont à intégrer lors des consultations (matériel roulant) et études de conception (limitation des émissions et des transferts) pour les nouvelles lignes ou stations. Pour les enceintes existantes, les possibilités d'amélioration de la qualité de l'air dépendent des enceintes (géométries, ventilation, aéraulique) et du matériel utilisé.

- **Matériel roulant** : la réduction des émissions par le matériel roulant est le premier sujet sur lequel il convient de travailler. Peu de publications permettent à l'heure actuelle de préciser les axes d'amélioration portant sur la limitation chiffrée des

Underground railway and subway systems

Main pollutants

From the 2000s the Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) has issued several opinions related to the air quality in the premises of underground railway and subway systems and they recommend to develop the monitoring of the air quality. As a consequence, the measurement of PM₁₀, MAH, NO₂ concentrations is now effective in several transport networks; the content of PM10 may be analysed to take into account the amount of metals (iron, nickel, chrome, manganese, lead, cadmium), crystalline silica, fibres and PAH.

A lot of recent data are available to the users. The authors as a whole consider that the air pollution by particles is the main determinant of the air quality of these premises. The origin of this air pollution by metallic particles comes from the use of the rolling stock (braking for 70% of the emissions, contact between the wheels and the rails for 30% of the emission, catenary lines and pantographs for less than 1%). Today the knowledge of these emission is fragmented, in France as well as at the international level.

Ventilation of these premises

For the ventilation of these premises in France, there are requirements for the smoke extraction in the tunnels (Ministry for ecology and sustainable development, 2011), (JORF, 2007), (JORF, 2005)) and 0.36 m³/h/m² is the minimum value of the fresh air flow taking into account that these premises are episodically occupied by users.

Ventilation of underground stations is complex in the sense that it is the result of a natural process (due to pressure and temperature differences between indoors and outdoors) and a mechanical process (air is mechanically introduced and/or extracted in tunnels and/or in stations, piston effect when the trains enter or leave the stations). Otherwise, in a dense transport network, there are a lot of connections which creates a very complex air flow pattern. The amount of data regarding air flows in such premises are scarce.

However from the pollution transport point of view, the state of the art shows that particles are mainly transported by the piston effects and that the entry and the exit of the trains from the stations is the determinant of the air quality degradation.

Ways of improvement

Identified ways of improvement are of technical nature: decrease of the emissions at the source, limitation of the transfers (ventilation, station arrangement), pollution reduction with ventilation or air cleaning. These elements have to be taken into account at the time of the consultation (rolling stock) and the design studies (to limit emissions and transfers) for new lines and new stations. For the existing premises, ways of improvement of the air quality depend on the premises characteristics (geometry, ventilation, air flow pattern) as well as the rolling stock.

- **Rolling stock**: the reduction of the emissions from the rolling stock has to be considered first. There are few data available in the literature to help us to understand how to limit the emissions due to braking and contacts between wheels and rails. Development and research projects are necessary in order to make changes on the composition and the amount of the emission from the rolling stock and the braking system.

émissions liées au freinage et au contact rail roue. Des travaux de recherche et développement sont nécessaires afin de faire évoluer la composition et les émissions du matériel roulant et du système de freinage.

- **Nettoyage des voies et quais** : les études recensées sont peu nombreuses et ne mettent pas en évidence d'amélioration significative de la qualité de l'air des enceintes. La réalisation d'études sur l'effet du nettoyage et de son mode de mise en pratique est nécessaire avant de statuer sur l'efficacité ou non de telles opérations d'entretien.
- **Captation à la source** : deux systèmes en cours de développement ont été recensés, la filtration (inertielle et magnétique) sous les trains et le captage (puis filtration inertielle) au niveau des freins. Ces deux techniques sont encore au stade R&D, des études de faisabilité et d'efficacité étant nécessaires.
- **Réduction des transferts**
 - Installation de portes entre les voies et le quai : les portes entre les voies et le quai (PSD : platform screen doors), quand elles séparent totalement les voies et le quai, semblent réduire efficacement les concentrations en particules sur les quais mais ce dispositif doit s'accompagner d'une modification de la ventilation des stations et de la filtration de l'air des rames (car la pollution est davantage concentrée dans les tunnels).
 - Extraction mécanique sous les voies : aucune étude de l'impact sur la qualité de l'air de ce système de ventilation n'a été recensée. Compte tenu de l'influence théorique que l'extraction de l'air sous les voies/quais peut avoir sur les concentrations dans l'air des stations, la conduite d'études spécifiques sur le sujet serait nécessaire.
 - Limitation des transferts depuis les tunnels : La limitation des transferts de polluants depuis les tunnels reposant sur la réduction des vitesses des trains, la mise en place de ventilateurs-accélérateurs dans les tunnels et la mise en place de rideaux d'air en entrée/sortie de tunnel semble, de la littérature étudiée, effective sans que le taux d'abattement ait été quantifié. Compte tenu des faibles retours d'expériences recensés, ces techniques nécessitent des études complémentaires.
- **Traitement de l'air** : compte tenu des débits d'air importants et de la priorité à donner à la réduction des émissions à la source et des transferts, le traitement par filtration de l'air n'est pas un axe d'amélioration recommandé.

- **Cleaning of tracks and platforms**: few studies have been done and the available data do not show that cleaning of tracks and platforms can improve the air quality. New studies are necessary in order to evaluate the efficiency of the cleaning.
- **Capture at the source**: 2 different systems under development have been identified, air filtration (inertial and magnetic) under the trains and emission capture (then inertial filtration) close to the brakes. Feasibility studies have still to be done and the efficiency of such systems has to be proved.
- **Transfer reduction**:
 - Use of platform screen doors (PSD): it has been shown that when PSD completely separate platforms from the tracks, then the particle concentration measured on the platforms seems to be lower. As a consequence, such device concentrate air pollution in the tunnels and thus the air provided to the train has to be filtered.
 - Mechanical extraction of air under the tracks: there is no study on the impact of such ventilation system on the air quality. But it is believed that such ventilation system could be efficient and so it appears necessary to carry out studies on this issue.
 - Transfer limitation from the tunnels: in order to limit the transfer of the pollution from the tunnels to the platforms, the limitation of the speed of the trains, the use of fan accelerators, the use of air curtains at the entry/exit of the tunnels, seems, from the studied literature, efficient but the level of this efficiency has not been quantified. Thus, more studies are necessary.
- **Air cleaning**: taking into account that air flows are very high and that it is first recommended to limit the pollutant emissions and to limit their transfer, it is not recommended to carry out more studies on air cleaning.