

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**PARTICULES EMISES PAR LES ACTIVITES DE TRAITEMENT
DES DECHETS, DE LA CARACTERISATION
A L'IMPACT SANITAIRE
ÉTAT DES CONNAISSANCES**

**WASTE TREATMENT AND ATMOSPHERIC EMISSIONS OF
PARTICLES, FROM CHARACTERISATION TO HEALTH IMPACT
STATE OF KNOWLEDGE**

novembre 2008

Crée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets – 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.

En Bibliographie, le document dont est issue cette synthèse sera cité sous la référence :

RECORD, Particules émises par les activités de traitement des déchets, de la caractérisation à l'impact sanitaire. État des connaissances, 2008, 152 p, n°06-0666/1A

Synthèse

La revue bibliographique réalisée a pour objectif de fournir un état des connaissances relatives aux particules¹ émises dans l'environnement par les activités de traitement de **déchets dangereux et non dangereux**, que sont **l'incinération, incluant la co-incinération, le stockage et le compostage**. En effet, de par leurs caractéristiques physiques (diamètre aérodynamique par exemple) et les espèces biologiques et chimiques qui leur sont associées, les particules sont des vecteurs potentiels de risque qu'il est essentiel de prendre en compte lors de l'évaluation de l'impact sanitaire de ces installations.

Les particules présentes dans les rejets atmosphériques et dans l'air ambiant, sont désignées sous le terme d'aérosols pour englober le milieu gazeux dans lequel elles sont en suspension. Le diamètre aérodynamique d'une particule va de quelques nanomètres (on parle alors de nanoparticules ou particules ultrafines) à la centaine de micromètres. De nature très variée, minérale, carbonée, aqueuse ou biologique, les particules peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. Elles sont caractérisées par plusieurs paramètres que sont, parmi les plus couramment utilisés, la concentration massique, la taille et le nombre. Les particules issues des filières industrielles étudiées peuvent être associées à des composés chimiques organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques – HAP, polychlorobiphényles – PCB, dioxines/furanes – PCDD/F) ou métalliques (métaux lourds), ainsi qu'à des espèces biologiques. La problématique a ainsi été considérée, d'une part, sous l'angle des **polluants spécifiques** émis sous forme particulaire par les activités étudiées (métaux, dioxines/furanes, bioaérosols...) et pouvant être transférés dans les matrices environnementales, et d'autre part, du point de vue des **classes granulométriques** susceptibles de présenter un risque pour la santé compte tenu des connaissances épidémiologiques et/ou toxicologiques disponibles à ce jour (PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, particules ultrafines² ; exposition par inhalation exclusivement).

Tout d'abord, en ce qui concerne les **émissions de particules dans l'air ambiant**, deux catégories sont à distinguer : les émissions *canalisées* d'une part, issues d'une cheminée (ou d'un rejet ponctuel assimilable) et faisant éventuellement l'objet d'un traitement préalable, et les émissions *diffuses* d'autre part, à savoir les autres émissions telles que les fuites de bâtiment (bouches de ventilation ou non), les émissions dues au transport ou au stockage à l'air libre de matière... Le mode de fonctionnement des filières étudiées détermine pour chacune des types d'émissions spécifiques : les sites d'incinération et de co-incinération, ainsi que les sites fermés de compostage sont principalement associés à des émissions canalisées, alors que les sites ouverts de compostage sont plutôt caractérisés par des émissions diffuses de particules. Les sites de stockage de déchets sont quant à eux à la fois associés à des émissions canalisées (de biogaz par exemple) et diffuses.

La stratégie de mesure à mettre en œuvre pour caractériser les émissions atmosphériques diffère notablement selon que l'on s'intéresse à des émissions canalisées ou diffuses. La caractérisation des émissions canalisées de particules consiste à réaliser des mesures directement au point d'émission, en l'occurrence à la cheminée du site. Le seul paramètre réglementé à ce jour à l'émission de sources industrielles est la concentration en masse des particules totales (TSP). La mesure des fractions PM₁₀ et PM_{2,5} à l'émission des sources fixes fait l'objet d'un projet de norme en cours de préparation. La caractérisation des émissions diffuses consiste à mesurer les concentrations de particules et des espèces associées dans l'environnement du site. Les données ainsi obtenues peuvent être couplées à de la modélisation de la dispersion et valorisées par des traitements statistiques afin d'identifier, voire de hiérarchiser les sources. Une norme européenne relative à la caractérisation des émissions diffuses de particules est en cours de rédaction. Dans l'air ambiant, le seul paramètre réglementé à ce jour est la concentration en masse : PM₁₀, et depuis 2008, PM_{2,5}. Enfin, en hygiène professionnelle, la mesure vise les fractions inhalable (PM₁₀₀), thoracique (PM₁₀) et alvéolaire (PM_{4,5}).

¹ Les fibres (amiante par exemple), élément solide dont la longueur est supérieure à trois fois la largeur, ne sont pas incluses dans le champ de la présente étude.

² La notation PM_x désigne les particules de diamètre aérodynamique inférieur à x µm.

Cette synthèse bibliographique a fait apparaître des thèmes de recherche relatifs à la caractérisation des particules qui méritent d'être approfondis :

- la caractérisation physico-chimique des émissions canalisées de PM_{10} et de $PM_{2,5}$;
- la répartition des espèces organiques et des éléments métalliques entre les phases gazeuse et particulaire et au sein des fractions granulométriques ;
- la mise en œuvre de méthodes de caractérisation en continu des concentrations massiques de particules et de granulométrie en nombre notamment pour les particules ultrafines ;
- la caractérisation des émissions diffuses de particules.

Ensuite, durant leur **transport**, les particules émises à l'atmosphère sont soumises à de nombreux mécanismes de formation et transformation physico-chimique (nucléation, coagulation, condensation, évaporation, dépôt sec et humide). Pour qualifier et quantifier l'effet des émissions de particules sur l'atmosphère et les sols, il s'agit donc non seulement de simuler la dispersion des particules sous l'action de la météorologie, mais aussi de représenter les processus physico-chimiques qui déterminent leur évolution.

Il existe plusieurs types de **modèles de dispersion atmosphérique**. Les modèles boîtes utilisent une description extrêmement simplifiée de l'atmosphère et du transport. Ils fournissent une information qualitative sur l'impact d'une source. Les modèles gaussiens expriment les concentrations sous une forme analytique dont les paramètres sont fonctions de la météorologie, des conditions d'émission et des caractéristiques du site. Ils incluent des paramétrisations relativement simples afin de tenir compte des principaux facteurs qui influencent la dispersion (relief, bâtiments...) et permettent la réalisation de calculs sur des périodes pluriannuelles. Les modèles lagrangiens et eulériens résolvent numériquement les équations du transport et de la diffusion des polluants. Ce sont les plus précis et les plus adaptés aux environnements complexes (zones montagneuses, présence d'obstacles) ; ce sont aussi les plus lourds à mettre en œuvre.

Tous ces modèles, du plus simplifié au plus développé, permettent de simuler le transport passif à partir d'une source d'émission et le dépôt au sol des particules. En revanche, si la physico-chimie des particules est bien décrite en théorie, sa prise en compte est plus délicate et se révèle très variable d'un modèle à un autre. Dans les modèles gaussiens, qui servent principalement à évaluer l'impact local d'installations industrielles, les réactions physico-chimiques subies par les particules ne sont pas représentées. Dans les modèles tridimensionnels lagrangiens ou eulériens, dont l'usage s'étend également à des applications industrielles, elles sont décrites de façon partielle ou détaillée, selon le module de chimie incorporé.

Le choix d'un modèle est guidé par les échelles spatiale et temporelle considérées, les caractéristiques environnementales (météorologie, relief, bâtiments...), le niveau de précision recherché et les données d'entrée disponibles. Les possibilités et les limites de chaque modèle pour simuler la dispersion des gaz sont mises en évidence par de nombreux travaux de validation et d'intercomparaison. Ces résultats valent aussi pour le transport et la diffusion des particules puisque ces dernières (du moins les particules de diamètre inférieur à $10\ \mu\text{m}$) se dispersent comme des gaz. Toutefois, l'évaluation des modèles pour les aspects qui relèvent du dépôt et des phénomènes propres aux particules souffre encore d'un manque de données expérimentales.

Pourvu qu'ils soient choisis selon les spécificités de l'étude et que l'on dispose de données d'entrée appropriées, les modèles de dispersion atmosphérique n'en constituent pas moins un moyen utile d'estimer l'impact local d'émissions de particules. La principale limite dans leur application au secteur des déchets réside dans la définition des termes sources. En effet, si la plus grande partie des émissions dues à l'incinération est canalisée, il en va différemment des émissions liées au stockage ou au compostage. Diffuses, intermittentes, celles-ci sont beaucoup moins aisées à caractériser. Des méthodes sont proposées pour les quantifier, mais leur application en situation réelle reste délicate. La seconde limite est la difficulté qu'ont les modèles, y compris les modèles tridimensionnels, à calculer précisément les concentrations en champ proche. Ce défaut a peu d'incidence lorsque les rejets sont canalisés et ont lieu en hauteur (les distances d'impact maximal sont alors généralement supérieures à une centaine de mètres). Il est plus pénalisant dans le cas d'émissions diffuses, dont l'influence se fait sentir sur de faibles distances.

Une fois déposées sur les sols, les particules, qui ne sont alors considérées qu'au regard des composants adsorbés, peuvent subir des phénomènes très variés : ré-envol, dégradation chimique, lixiviation, ruissellement... Les sols jouent ainsi un rôle central dans la dispersion et le stockage des contaminants dans l'environnement. Ils sont dès lors étroitement liés aux autres compartiments environnementaux (eau, végétaux) vers lesquels le transfert de contaminants peut engendrer des expositions humaines par d'autres voies (ingestion notamment).

Les contaminants se répartissent entre les différentes phases du sol en fonction de leurs propriétés physico-chimiques. Les composés dont la fraction solide dans les sols est majoritaire ont été étudiés préférentiellement. La fraction solide dans les sols est composée d'une fraction minérale et d'une fraction organique regroupant de nombreux composés particulièrement réactifs qui interagissent avec les composés exogènes. Ces interactions aboutissent à la formation d'associations plus ou moins fortes entre la matière du sol et les contaminants dont le devenir est influencé par les propriétés des éléments endogènes du sol. Ainsi, l'adsorption sur les phases solides, dont l'intensité est variable, limite la biodisponibilité des composés dans les conditions données et leur biodégradation. Toutefois, cette adsorption peut aboutir à une re-mobilisation des composés lors de la variation des conditions du milieu dans le temps (paramètres physico-chimiques). Elle peut aussi favoriser le transfert de certains contaminants *via* le transfert de particules solides. Ainsi, certains polluants organiques persistants et éléments traces métalliques voient leur transfert vertical favorisé par leur adsorption à des particules solides du sol. Leur dispersion dans l'environnement peut se faire par les phénomènes d'érosion des sols. Le ruissellement peut également contribuer à la dispersion plus ou moins locale des contaminants et favoriser leur concentration dans des milieux récepteurs (sédiments, aquifères...). La remise en suspension de particules du sol peut entraîner la contamination de la surface des végétaux pouvant avoir un impact non négligeable dans le cas des fourrages pour animaux et des pâturages. Les transferts de particules dans les sols et à partir de ceux-ci ne sont pas toujours intégrés dans la démarche d'évaluation des risques, alors qu'ils jouent potentiellement un rôle important dans le devenir des contaminants et les expositions des écosystèmes et de la population.

Du point de vue des **effets sur la santé et de la quantification des risques sanitaires**, cette étude rassemble les données de la littérature établissant des relations entre particules émises par les activités considérées et effets sanitaires chez les travailleurs et les riverains. Elle révèle le peu de données disponibles, mis à part pour les bioaérosols, abordés ci-après, et les dioxines/furanes associées à l'incinération. De façon générale, s'agissant des effets sur la santé des PM₁₀ et PM_{2,5} indépendamment des installations industrielles étudiées, les études épidémiologiques sur les effets à court terme de la pollution atmosphérique urbaine ont permis d'observer une corrélation entre l'augmentation des niveaux de particules dans l'air ambiant et celle des événements sanitaires (hospitalisation pour cause cardio-vasculaire et respiratoire, consommation de broncho-dilatateur, incidence de la toux, crise d'asthme, diminution des performances respiratoires...). Les études épidémiologiques s'étant intéressées aux effets à long terme des expositions aux particules sur la santé, suggèrent quant à elles un lien entre les concentrations particulaires dans l'air ambiant et la mortalité (toutes causes, causes respiratoires ou causes cardio-vasculaires). Toutes ces études vont dans le sens de l'existence de relations sans seuil entre les expositions et les effets, aux niveaux de concentration mesurés dans l'air. Par ailleurs, les études de toxicologie expérimentale confirment le potentiel inflammatoire des particules sur les cellules de l'appareil respiratoire. Des travaux récents posent la question des effets sanitaires des particules ultrafines, jusqu'à présent peu considérées à défaut d'une métrologie adéquate pour les caractériser.

Le retour d'expérience sur la prise en compte des particules dans les évaluations quantitatives rétrospectives ou prospectives de risques sanitaires liés au fonctionnement de ces installations montre que les approches sont très hétérogènes, quel que soit le secteur étudié, et qu'il n'y a pas de consensus à ce jour sur l'approche à retenir. Les effets sans seuil des particules semblent désormais reconnus. Cependant, il n'existe pas de valeurs toxicologiques de référence pour ces effets sans seuil. Le recours aux risques relatifs ou fonctions exposition-risque issus des études épidémiologiques décrites ci-dessus, pour l'évaluation quantitative des risques sanitaires liés aux particules émises par les installations d'incinération, de stockage et de compostage de déchets, ne fait pas l'unanimité du fait de particules de natures différentes, de tailles de populations exposées différentes et d'objectifs autres. Certaines évaluations proposent l'utilisation des valeurs guides de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), *a minima* pour la mise en perspective des niveaux d'exposition. Mises à jour en 2005, ces dernières sont des valeurs de gestion destinées à favoriser la mise en place de politiques publiques pour la réduction des émissions de particules.

La prise en compte des particules ultrafines (émission, air, exposition, mesure ou modélisation) reste encore très rare, de façon générale et dans le domaine des activités étudiées, en l'absence de métrique consensuelle et homogène. Eu égard aux premiers éléments relatifs à leur toxicité, l'étude des particules ultrafines associées aux installations de traitement de déchets, notamment l'incinération (aérosols de combustion), se révèle être un axe de recherche d'un intérêt indéniable.

Enfin, en ce qui concerne plus spécifiquement les **bioaérosols**, cette étude actualise les données disponibles pour les filières de traitement des déchets étudiées.

Les bioaérosols sont des particules biologiques mises en suspension dans l'air, de diamètre compris entre 0,002 et 100 µm. Les émissions des activités d'incinération et de stockage sont peu renseignées. Une pollution particulaire caractérise l'activité d'incinération avec la présence en quantité importante de champignons, notamment au niveau des zones de déchargement et de broyage des déchets. La pollution particulaire est faible pour l'activité de stockage. Les pics d'émission de bioaérosols, notamment d'*Aspergillus fumigatus* et de bactéries Gram négatif, sont typiques de cette activité lors du déversement et du tassement des déchets frais dans les alvéoles en exploitation. L'activité de compostage a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années, mais la caractérisation des émissions reste souvent limitée aux bactéries et champignons totaux. Celle-ci est rendue complexe par la variété des configurations existantes (site ouvert/fermé, procédé, type de déchet composté...). Les étapes de manipulation du compost sont les plus émissives (pollution particulaire importante), notamment le compostage ouvert en andains de déchets verts.

Les populations exposées (essentiellement travailleurs, puis riverains des installations) peuvent théoriquement développer des pathologies diverses (symptômes allergiques, toxiques, irritatifs, infections) selon le type de bioaérosol impliqué, le niveau d'exposition et la sensibilité individuelle. L'exposition des travailleurs est peu étudiée. Les études d'exposition des travailleurs aux bioaérosols émis par les installations d'incinération et de stockage sont rares. D'après la littérature, les travailleurs sur site de compostage sont exposés à des concentrations 10 à 1000 fois supérieures à celles retrouvées dans l'air ambiant.

La modélisation de la dispersion atmosphérique des bioaérosols a été développée de façon récente, principalement pour les installations de compostage. La viabilité des bioaérosols dans l'air repose essentiellement sur leurs caractéristiques intrinsèques d'une part, et sur des facteurs environnementaux d'autre part (humidité, température, radiations, composition de l'air). Aucune donnée sur le devenir des bioaérosols après dispersion atmosphérique n'a été trouvée dans la littérature. Les concentrations en bactéries et champignons de l'environnement extérieur, hors zone d'influence des sites de traitement de déchets, rapportées dans la littérature varient de 200 à 10³ UFC/m³. Aucune étude d'exposition de la population générale riveraine d'installation d'incinération n'a été recensée. L'activité de stockage ne semble pas augmenter de manière significative les concentrations en bioaérosols dans l'air inhalé par les riverains. En général, au-delà de 200 à 250 m, les bioaérosols émis par les sites de compostage ne sont plus différenciables du bruit de fond.

S'agissant de l'impact sanitaire, aucun lien n'a été mis en évidence entre l'exposition aux bioaérosols émis par des installations d'incinération et les effets sanitaires chez les travailleurs. Les études cliniques ou épidémiologiques concernant les risques biologiques pour les travailleurs des installations de stockage de déchets sont peu nombreuses et leur interprétation limitée. Les risques sanitaires d'origine biologique pour les riverains n'ont pas été étudiés. La connaissance des risques sanitaires liés au compostage de déchets pour les travailleurs reste très limitée. Les données permettant de caractériser les risques sanitaires pour les populations riveraines sont quasiment absentes. Les données disponibles ne mettent pas en évidence de preuves d'effets sanitaires spécifiques. Il existe un risque théorique d'ordre allergique chez des sujets immunodéprimés. En l'état actuel des connaissances, il n'existe pas de relations dose-réponse établies au niveau national ou international.

Au bilan, les champs de recherche identifiés comme prioritaires, pour le domaine des bioaérosols, portent sur 1) la mise au point d'une standardisation internationale des méthodes d'échantillonnage et de dénombrement des bioaérosols dans l'air, 2) une meilleure caractérisation des particules avec acquisition de données sur des sites en France, 3) la caractérisation de l'exposition professionnelle et la mise en œuvre d'études épidémiologiques prospectives pour les travailleurs du compostage, 4) l'étude appliquée de la viabilité des bioaérosols en pilote et en études de terrain, 5) la mise en œuvre d'une étude épidémiologique pour préciser l'impact sanitaire pour les riverains d'un site de compostage ouvert traitant des déchets verts.

Extended abstract

This review aims at providing a state of knowledge on particles emitted in the environment by different industrial waste treatment activities: **incineration, including co-incineration, storage and composting**. Both **dangerous and non dangerous waste** are considered. Regarding their physical characteristics (aerodynamic diameter for example) and the biological and chemical species to which they are associated, particles may present risk for public health. That's why it is essential to take them into account while assessing health impact of such industrial plants.

A particle is a solid compound suspended in the air. Considered within the surrounding gas, particles constitute the atmospheric aerosols. Particle aerodynamic diameters range from a few nanometers (particles are thus called nanoparticles or ultrafine particles) up to hundred micrometers. Particles have rather miscellaneous nature: mineral, carbonaceous, aqueous or biological, and can be natural or produced by human activities. They are characterised by different parameters, e.g. mass concentration, size and number. Particles emitted in the air by industrial waste treatment activities can be associated with organic chemical compounds (polycyclic aromatic hydrocarbons - PAH, polychlorobiphenyls - PCB, dioxins/furans - PCDD/F) or metals, as well as with biological species. On the one hand, the **specific pollutants** emitted in particulate phase (metals, dioxins/furans, bioaerosols...) and likely to be transferred to the environment are considered. On the other hand, particles are studied regarding their **size ranges** likely to present a health risk once inhaled, taking into account epidemiological and/or toxicological knowledge (e.g. PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, ultrafine particles).

The first part aims at defining the main **measurement parameters** to be taken into account when dealing with particulate matter characterisation. Measurement strategies and techniques to be used to study stack and diffusive emissions are described. This part also includes results from the main studies of characterisation that have been carried out within the industrial sectors of interest. Recommendations concerning research to promote in order to improve the state of knowledge in terms of particulate matter characterisation are also formulated in this study.

During their **transport**, the particles emitted to the atmosphere are subject to a large number of mechanisms controlling their growth and physico-chemical evolution (nucleation, coagulation, condensation, evaporation, dry and wet deposition). To qualify and quantify the impact of particle emissions on the atmosphere and the ground, it is therefore necessary not only to simulate the **dispersion of particles** under the effect of meteorology, but also to model the aerosol dynamics. There are several types of atmospheric dispersion models. Box models are based on an extremely simplified description of the atmosphere and the transport. They provide qualitative information about the impact of a source. Gaussian models use an analytical expression of concentrations, the parameters of which are calculated as a function of meteorology, emission conditions and site characteristics. They include relatively simple parameterisations to account for the main factors influencing dispersion (terrain, buildings...). Dispersion over several years of meteorological conditions can be simulated. Lagrangian and eulerian models numerically solve the equations of pollutant transport and diffusion; they are more precise and more suitable for complex environments (mountainous areas, numerous obstacles) than the previous two categories of tools. It is also more difficult to implement them. All kinds of models, from the most simplified to the most developed one, make it possible to simulate passive transport from an emission source and the deposition of particles onto the ground. However, whereas the physico-chemical processes of particles are well described in theory, their modelling is complex and can be very different from a model to another. In gaussian models, mostly intended to assess the local impact of industrial installations, the physico-chemical reactions undergone by particles are ignored. In tridimensional eulerian or lagrangian models, which meet growing interest for industrial impact studies, they are described in a partial or detailed way according to the built-in chemistry module. Selecting a model depends on the considered spatial and temporal scales, the environmental features (meteorology, terrain, buildings...), the expected precision and the available input data. The capacities and limits of each model for simulating gas dispersion are shown by many validation and intercomparison studies. Such results also apply to the transport and diffusion of particles since particles (at least those having a diameter lower than 10 µm) disperse like

gas. However, the evaluation of models as regards the deposition and the phenomena affecting particulate matter suffers from a lack of environmental data.

Provided that they are chosen according to the characteristics of the study and that suitable input data are available, atmospheric dispersion models are still a useful means of estimating the local impact of particle emissions. The main issue limiting their application to the sector of waste treatment is the definition of the source term. Indeed, whereas emissions from incinerators are mostly canalised, emissions from landfills and composting facilities are often diffuse and intermittent. It is therefore much harder to characterise them. Quantification methods are proposed, but their application to real cases remains difficult. The second limit, which concerns all types of models, is the difficulty of precisely calculating near field concentrations. This drawback has actually no repercussions in case of punctual and elevated emission sources (the corresponding impact distances being generally longer than hundred meters). It is more prejudicial in case of diffuse emissions, whose influence is most significant within low distances.

Once deposited on the soils, contaminants are divided into different phases according to their physical and chemical properties. Compounds mainly on the solid phase of soils were considered. Soil solid fraction consists of a mineral and an organic fractions comprising a large variety of compounds which interact with exogenous compounds. Adsorption of contaminants on solid phases limits their bioavailability and their biodegradation. However, the adsorption may lead to a remobilization of compounds while environmental conditions are evolving over time. It may also promote the transfer of some contaminants in the soil through the transfer of solid particles. Thus, vertical transfer of some persistent organic pollutants and trace metallic elements is promoted by their adsorption to solid soil particles. Their release in the environment can occur through soil erosion. The runoff may contribute to the spread of contaminants and promote their bioconcentration into environmental compartments such as sediments, aquatic ecosystems... Wind erosion and resuspension of particles can contaminate plants. Those types of transfer are not always considered in risk assessments. However, they may have a significant impact in case of transfer to animals through grazing and to vegetables and fruits. Soils play thus a central role in the dispersion and the storage of contaminants in the environment, which may lead to human exposure through pathways such as ingestion.

Concerning **health effects and risk assessment**, relations between particles emitted by the activities considered and health effects are collected. It shows the scarcity of data, except for biocontaminants (see below) and for dioxins/furans associated with waste incineration. Considering the PM10 and PM2.5 health effects in general, independently from waste treatment facilities, epidemiological studies on urban air pollution show a significant association between the increase of ambient air particle concentration and the increase of short or long term health effects (hospital admissions for cardiovascular and respiratory reasons, use of broncho-dilating medication, cough, asthma crisis, loss of respiratory performances, mortality). Results from toxicological experiments confirm the particle inflammatory potential on the respiratory tract cells. Recent papers demonstrate the probably non-negligible health effects of ultrafine particles, poorly characterised to date.

Methodological approaches to consider particles in risk assessments associated to waste treatment facilities are heterogeneous. The absence of threshold effects of particles is now recognised by the scientific community. However there are no toxicological values for those effects. The use, for quantitative risk assessment linked to particles emitted by waste incineration, storage and composting, of relative risks from the epidemiological studies described here does not make consensus because of the heterogeneity of particles, populations and objectives. Some studies use the values from the World Health Organisation (WHO). Upgraded in 2005, these threshold values are clearly considered by WHO as non fully protective for public health and established to support public policies for the reduction of particle emissions.

The ultrafine particles, especially those emitted by incineration, should be considered more carefully.

Bioaerosols are airborne biological particles, which range in size from submicroscopic to 100 µm diameter particles. Emissions from incineration and waste landfills are poorly described. Incineration is characterised by a particulate pollution with the presence of fungi, in particular in working areas such as the crane room and the bunker (crushing of waste). Particulate pollution is low for waste landfills. Concentration peaks, in particular of *Aspergillus fumigatus* and negative Gram bacteria, are typical in the unloading and compacting areas. Regarding the composting, there are far more data but the characterisation of emission often remains limited to total bacteria and fungi and there are different kinds of composting technologies. Agitation activities are the most emissive in particular in open green waste composting sites.

Primarily exposed populations are workers, and secondly general population in the vicinity of sites. Occupational exposure is not well known. Data from incineration and landfills are scarce. According to the literature, workers on composting sites are exposed to levels from 10 to 1,000 times greater than those expected normally in ambient air.

Air dispersion modelling applied to waste activities is quite new and mainly improved for composting activity. Bioaerosols' viability in the air primarily depends on intrinsic characteristics of microorganisms and on environmental factors (relative humidity, temperature, radiations, air composition). No data concerning bioaerosols' environmental fate after air dispersion was found. Background air concentrations of bacteria and fungi range from 200 to 10³ CFU/m³. No exposure data was found for general population living in the vicinity of incineration plants. Landfill activities do not seem to significantly increase population exposure to bioaerosols. Bioaerosols from composting activities seem to be reduced to background levels within 200 to 250 m of the source.

Concerning health effects, all exposed populations can theoretically develop various health effects (allergic, toxic and irritating symptoms, infections) according to the type of bioaerosol they are exposed to, the level of exposure and the individual sensitivity. But there is no clear evidence of a causal link between bioaerosols exposure from incineration and occupational diseases. Health investigations for landfill workers are rare. The health risks for residents were not studied. There are only a few studies where workers' health on composting sites has been investigated. Studies on health risks for residents are lacking. Available data do not show specific health effects. There is a theoretical allergic risk for immunodeficient subjects. To date, there are not dose-response relationships established at national or international levels.

Further work shall focus on: 1) the development of an international standardisation of sampling and enumeration of endotoxins in the air; 2) a better characterisation of the particles released on waste sites in France; 3) the characterisation of occupational exposure and the implementation of prospective epidemiological studies for the workers of composting; 4) the experimental and 'on site' study of bioaerosols' viability; 5) the investigation of health risks for residents due to long-term exposure to open green waste composting bioaerosols.