

# DIFFUSION DE L'AIR DANS LES SALLES DE TRI DES CENTRES DE TRAITEMENT DES ORDURES MÉNAGÈRES

## Quelle ventilation au poste de travail ?

Les activités de tri des déchets ménagers peuvent être à l'origine de pathologies respiratoires ou digestives pour les salariés de ce secteur.

A partir de mesures effectuées sur sites, des moyens de prévention basés sur la ventilation sont proposés pour réduire la bio-contamination de l'air des salles de tri manuel. Il s'agit de placer chaque opérateur dans un flux d'air neuf unidirectionnel.

Les performances des installations de ventilation sont évaluées par la mesure des concentrations en poussières, d'indicateurs microbiologiques de qualité de l'air et des paramètres climatiques permettant une estimation du confort thermique du personnel. Les résultats portent sur l'étude de deux cabines de pré-tri pour lesquelles un diagnostic est effectué avant puis après modification des installations de ventilation.

L'évolution du contexte législatif (loi « Royal » du 13 juillet 1992, circulaire « Voynet » du 28 avril 1998) est à l'origine du développement de l'activité de valorisation des déchets ménagers. Plus de 300 unités de traitement assurent actuellement le tri d'environ 6,5 millions de tonnes d'ordures ménagères (OM) issues de la collecte sélective [1].

L'activité de tri des déchets ménagers étant relativement récente, il est difficile d'évaluer quantitativement les risques à moyen et long terme pour la santé des opérateurs. Plusieurs études les ont cependant mis en évidence : risque de troubles musculo-squelettiques, risque mécanique, risques biologique et chimique, etc. [2-5].

De nombreux travaux ont révélé une exposition professionnelle importante aux micro-organismes (bactéries, bactéries Gram négatives, endotoxines, moisissures, etc.) des salariés travaillant

dans le secteur des déchets ménagers (collecte, usines de compost, centres de recyclage). Ces expositions peuvent être à l'origine de problèmes respiratoires, du syndrome toxique par exposition aux poussières organiques, de troubles gastro-intestinaux, d'irritations de la peau, des muqueuses et des yeux [6, 5, 7].

Malgré les avancées techniques de ces dernières années, les machines automatiques (trommels, tri balistique, etc.) ne permettent de traiter qu'une partie des déchets et le tri manuel reste la phase indispensable du procédé où les salariés sont les plus nombreux et les plus exposés. La manipulation des déchets (bouteilles et flacons en plastique, boîtes en carton et briques pour produits alimentaires, canettes et boîtes métalliques pour liquides alimentaires, papiers, journaux, cartons d'emballage, etc.) est à l'origine d'émission de poussières organiques, de bactéries et de champignons. Ces émissions condui-

- Traitement des déchets
- Tri
- Bioaérosol
- Ventilation

► Roland RAPP, Jean-Raymond FONTAINE, Francis HENRY, INRS, département Ingénierie des procédés

► Philippe DUQUENNE, Véronique KOEHLER, Guylaine GREFF, Siwei LIANG, Peter GÖRNER, INRS, département Métrologie des polluants

► Alain BECKER, Centre inter-régional de mesures physiques de l'Est (CIMPE)

### AIR DIFFUSION IN SORTING ROOMS AT DOMESTIC WASTE TREATMENT CENTRES. WHAT WORK STATION VENTILATION?

Domestic waste sorting may be the cause of respiratory or digestive diseases for employees in the waste treatment sector.

Site measurements have led us to propose ventilation-based prevention methods for reducing biocontamination risk in manual sorting rooms. Each operator is in fact positioned in a unidirectional fresh air flow. Ventilation system performance characteristics have been evaluated by measuring dust concentrations, biological indicators and climatic parameters, providing an estimate of the personnel's thermal comfort. Findings are based on a design study involving two pre-sorting cabins before and after modifying the ventilation systems.

- Waste treatment
- Sorting
- Bioaerosol
- Ventilation

sent à une exposition importante des travailleurs des postes de tri [4, 5, 8, 9, 10, 11].

En termes de protection collective du personnel vis-à-vis du risque biologique, les guides de conception [12, 13] promeuvent, pour les opérations de tri manuel, une ventilation concentrée sur le poste de travail en place d'une ventilation classique par mélange à de l'air neuf. Ce dernier mode de diffusion d'air a le défaut de remettre en suspension des particules issues des nombreuses sources présentes dans le local. À l'inverse, la ventilation par plénum soufflant au-dessus de chaque poste de travail permet un apport d'air neuf extérieur au niveau des voies respiratoires de l'opérateur avant tout mélange avec l'air contaminé du local.

Cependant, il subsiste quelques réticences dans la mise en application de ces systèmes, certains professionnels, installateurs ou exploitants les jugeant trop coûteux ou sous-estimant le risque.

Cet article a pour objet de présenter la faisabilité et l'intérêt, sur le plan de la réduction de la concentration en bioaérosols, à adopter une ventilation par plénum soufflant plutôt qu'une ventilation par mélange dans une salle de tri de la collecte sélective. La méthodologie est basée sur la conduite d'une opération pilote dans un site industriel de la région Lorraine. Les postes de tri de deux salles de pré-tri ont été comparés avant et après modification, la ventilation par mélange ayant été remplacée par des plénums de soufflage placés au-dessus de trieurs. L'ambiance au poste a été évaluée par mesure de la concentration en microorganismes (bactéries et moisissures cultivables), de la concentration moyenne en particules inhalables et du confort thermique au poste de travail. Les évaluations ont été conduites en périodes estivale et hivernale.

## RISQUES BIOLOGIQUES LIÉS AUX OPÉRATIONS DE TRI DES ORDURES MÉNAGÈRES

Les microorganismes sont presque toujours présents dans l'air mais leur nombre et leur diversité varient en fonction du moment de la journée, des conditions climatiques, de la saison, de la localisation géographique et de la présence d'une source [14].

Les déchets contenant de la matière organique constituent un excellent substrat pour la croissance des microorganismes. Les bactéries et les moisissures peuvent s'y développer et atteindre des concentrations comprises entre  $10^2$  et  $10^9$  UFC/g (Unités Formant Colonie par gramme de matière) selon le type de déchet et le procédé de traitement [5]. Ces agents microbiens peuvent être mis en suspension dans l'air des postes de travail lors des opérations de traitement de déchets. Lors de ces opérations, les salariés sont exposés à la fois à des poussières organiques et à des microorganismes ainsi que leurs composés et produits (endotoxines, (1,3)- $\beta$ -D-glucanes, mycotoxines, etc.). Ainsi, les microorganismes et leurs composés ont été mesurés, parfois à des concentrations importantes, lors de la collecte [15, 16], du tri et de l'incinération des déchets ménagers [17] ou lors des opérations de compostage [18]. L'examen des nombreux travaux et quelques revues bibliographiques sur le sujet montrent que les salariés impliqués dans le tri des déchets peuvent être exposés à des concentrations en microorganismes dans l'air très variables. Des concentrations comprises entre  $10^2$  et  $8,4 \times 10^5$  UFC/m<sup>3</sup> pour les bactéries, entre  $< 10$  et  $2 \times 10^6$  UFC/m<sup>3</sup> pour les moisissures, entre 1 et 9 900 UE/m<sup>3</sup> (Unités Endotoxines par mètre cube d'air) pour les endotoxines et entre 0 et 137 ng/m<sup>3</sup> pour les (1,3)- $\beta$ -D-glucanes ont ainsi été rapportées dans différentes études [5, 17, 19 - 21]. La nature et la concentration des agents microbiens présents dans l'air des usines de tri varient selon le type de déchets traités, leur manipulation et leur agitation mécanique, la vitesse du vent et les conditions météorologiques.

L'exposition aux bioaérosols aux postes de travail peut être préjudiciable pour la santé des travailleurs. Elle peut pré-

senter des risques de nature infectieuse, toxinique, immuno-allergique selon la nature des agents en présence [14, 22]. Des atteintes respiratoires et oculaires ont été observées parmi les salariés de la filière consécutivement à l'exposition aux poussières organiques [23, 24]. Ces symptômes ont été attribués, pour partie, à l'exposition des salariés aux microorganismes et à leurs composés qui sont mis en suspension dans l'air lors des opérations de tri [20, 5]. Les bactéries (dont les actinomycètes) et les moisissures sont les microorganismes les plus souvent incriminés pour expliquer ces symptômes. Les symptômes et les maladies liés aux risques immuno-allergiques sont des rhinites, des asthmes et des pneumopathies d'hypersensibilité. Ces symptômes peuvent apparaître chez des individus suite à l'inhalation de spores fongiques ou bactériennes, de mycélium, de fragments fongiques, d'antigènes associés à ces éléments ainsi que de métabolites. L'exposition à des composés entrant dans la constitution des moisissures et des bactéries ou qui sont des produits de leur métabolisme peut présenter des risques toxiques. L'exposition aux (1,3)- $\beta$ -D-glucanes a été associée à des irritations des voies supérieures respiratoires et de la fatigue [25, 26] mais la relation dose-réponse n'est pas définie. Les endotoxines sont également impliquées dans des symptômes similaires.

En dépit de la reconnaissance de l'effet des microorganismes aéroportés sur la santé des travailleurs et de la nécessité de réduire les risques biologiques liés à leur exposition, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de VLEP (Valeurs limites d'exposition professionnelle) pour les bioaérosols. Au mieux, quelques valeurs guides sont proposées par des organismes étrangers [27]. Par exemple, l'IRSST propose un niveau d'action pour les bactéries en milieu industriel se situant à  $10^4$  UFC/m<sup>3</sup>. Pour les moisissures, une action est envisagée dès lors que la concentration mesurée dépasse la concentration de base dans l'air d'un site de référence (généralement  $< 10^3$  UFC/m<sup>3</sup>). Pour les endotoxines, ce niveau guide peut être situé entre 50 et 200 UE/m<sup>3</sup>. Il n'y a pas encore de valeurs guides pour les (1,3)- $\beta$ -D-glucanes.

En réalité, ces niveaux guides permettent de situer le niveau de contamination générale au poste de travail. Ils ne suffisent pas à préciser les risques

liés à l'exposition à de telles concentrations. L'interprétation des mesures d'exposition aux bioaérosols est donc délicate. Pour évaluer l'exposition professionnelle aux bioaérosols de façon pertinente, il est nécessaire de prendre en considération non seulement la quantité des microorganismes qui entrent dans la composition d'un bioaérosol mais également leur identité.

## LES CABINES ÉTUDIÉES

L'étude expérimentale a été menée dans deux salles de pré-tri d'un centre de valorisation des déchets ménagers en exploitation.

La première cabine est située en début de ligne (cf. *Figure 1*) avec, initialement, quatre emplacements de travail permettant le rejet de cartons mais seuls deux postes sont habituellement occupés. Les dimensions de la cabine sont 5 m x 5 m et 2,75 m de haut. Elle

comporte un tapis de 1,5 m de large, quatre goulottes d'évacuation et quatre portes d'accès.

La seconde cabine est située entre le pré-tri rejets carton et la cabine de tri (cf. *Figure 2*). De dimensions inférieures à la première (1,8 m x 5 m et 2,5 m de haut), elle ne comprend que deux emplacements de travail pour le rejet de plastiques. Le tapis est de même largeur (1,5 m de large). Elle est pourvue de deux goulottes d'évacuation et quatre portes d'accès.

Pour la situation initiale, l'introduction de l'air neuf climatisé est assurée par deux bouches circulaires en plafond pour la première cabine et par un seul diffuseur circulaire pour la seconde cabine.

Une centrale de traitement de l'air (CTA) assure l'alimentation en air neuf de toutes les cabines (les deux cabines de pré-tri et la cabine principale).

La modification des installations de ventilation a consisté à séparer les

installations des cabines de pré-tri et de la cabine principale et à équiper chaque poste de travail des cabines de pré-tri d'un plénum de ventilation.

L'alimentation en air neuf des cabines de pré-tri est assurée par un nouveau réseau aéraulique et un caisson de traitement de l'air permettant de débiter 3 000 m<sup>3</sup>/h. Celui-ci est équipé d'un groupe froid de 21 kW et d'une batterie de chauffage de 18 kW.

Les diffuseurs circulaires sont remplacés par deux plénums soufflants dans chaque cabine, disposés au-dessus des postes habituellement occupés par les trieurs, de façon à les placer dans un flux d'air neuf directionnel capable de réduire la bio-contamination aux postes de travail tout en assurant le confort des opérateurs.

Ce type de plénum a été retenu sur la base d'une étude des caractéristiques aérauliques de quelques dispositifs effectuée en laboratoire afin d'en sélectionner un exemplaire pour équiper les postes de trieur [28]. Il s'agit d'un dif-

FIGURE 1

Poste de travail - Positionnement des dispositifs de prélèvements biologiques - Ventilation par mélange - Introduction de l'air par diffuseur circulaire  
En haut : Cassettes destinées aux prélèvements des microorganismes (M1 à M3) et des poussières (P1 à P3)



FIGURE 2

Poste de travail - Alimentation en air neuf par plénum



fuseur spécial assurant une barrière de confinement. Le débit minimal requis est de 600 m<sup>3</sup>/h par diffuseur.

L'efficacité des systèmes proposés est évaluée par la mesure d'indicateurs biologiques (bactéries cultivables, moisissures, endotoxines) et par la mesure de la concentration moyenne en particules inhalables.

Un diagnostic de l'existant a tout d'abord été dressé pour ces deux salles de pré-tri.

La modification des installations de ventilation des salles de pré-tri a été effectuée avant évaluation des dispositifs proposés, diagnostic réalisé sur la même base que celui effectué pour l'existant.

Les méthodes et moyens de mesures relatifs à la ventilation, au confort thermique et aux bioaérosols sont détaillés en @nmexe.

## RÉSULTATS

### LA VENTILATION

Initialement, l'introduction de l'air neuf en cabine 1 est assurée par deux diffuseurs circulaires, placés au plafond, en partie axiale de la cabine, de part et d'autre du tapis. Les débits de ventilation sont de l'ordre de 400 m<sup>3</sup>/h pour un diffuseur circulaire et de 150 m<sup>3</sup>/h pour le second.

Un seul diffuseur circulaire assure l'introduction de l'air neuf en cabine 2. Il est placé en plafond, dans un coin de la cabine. Le débit est de l'ordre de 220 m<sup>3</sup>/h.

Les débits de ventilation mis en œuvre dans les deux cabines permettent d'assurer huit à dix renouvellements d'air par heure. Ce débit est cependant insuffisant pour maintenir les cabines en surpression et la ventilation adoptée, de type mélange, favorise la dispersion des polluants.

Dans la configuration recommandée, un débit minimal de 600 m<sup>3</sup>/h par plénum de soufflage est requis. Le *Tableau 1* précise les débits mesurés

à chaque plénum au cours des différentes interventions échelonnées sur près de 18 mois après modification de l'installation de ventilation. Un réglage/équilibre a été réalisé en mars (première série de valeurs avant équilibrage, la seconde après réglage). L'encrassement du filtre sur la CTA a entraîné une décroissance dans le temps du débit de ventilation. Une valeur correcte a été retrouvée pour la dernière série de mesures réalisée après l'entretien de la centrale.

La décroissance du débit en fonction du temps est représentée *Figure 3*.

La *Figure 4* montre les écoulements, visualisés à l'aide d'un fumigène, obtenus à un poste de trieur placé sous un plénum alimenté avec un débit de ventilation de 600 m<sup>3</sup>/h. La température de soufflage est de 20,7°C et la température au niveau des voies respiratoires est de 18°C.

Pour un débit de 600 m<sup>3</sup>/h et une différence de température entre l'air introduit et l'air de la cabine légèrement inférieure à 3°C, l'air neuf issu du plénum de soufflage parvient tout juste au niveau des voies respiratoires de l'opéra-

teur. Le système fonctionne ici dans la configuration la plus pénalisante, c'est-à-dire introduction de l'air chaud dans une ambiance plus froide. Les voies respiratoires de l'opérateur sont néanmoins protégées d'une pollution émise au niveau du tapis.

Les résultats obtenus ici sont confirmés par l'étude menée en laboratoire sur la réponse aéraulique des diffuseurs en conditions an-isothermes. Cette étude a montré les limites d'utilisation de ces dispositifs : le fonctionnement du plénum ne permet pas de maintenir les voies respiratoires d'un opérateur dans le flux d'air neuf issu du diffuseur lorsque la différence de température entre l'air introduit et l'air de la cabine excède 3°C [28].

En période hivernale, un fonctionnement optimal ne pourra donc être obtenu que si les déperditions thermiques de la cabine sont réduites. Pour certaines conditions extrêmes hivernales, il sera nécessaire de prévoir un chauffage d'appoint de façon à pouvoir réduire au mieux les écarts de température.

TABLEAU 1

Débits de ventilation (en m<sup>3</sup>/h) - Situation APRES modification

DIFFUSEUR	D1	D2	D3	D4	TOTAL	OBSERVATION
22/02/2006	270	600	1435	550	2 855	
14/03/2006	1260	400	480	490	2 630	
14/03/2006	595	600	645	635	2 475	Équilibrage
23/06/2006	455	525	470	440	1 890	
07/11/2006	220	240	225	240	925	
20/06/2007	650	660	680	680	2 670	Après entretien

FIGURE 3

Évolution dans le temps du débit de ventilation

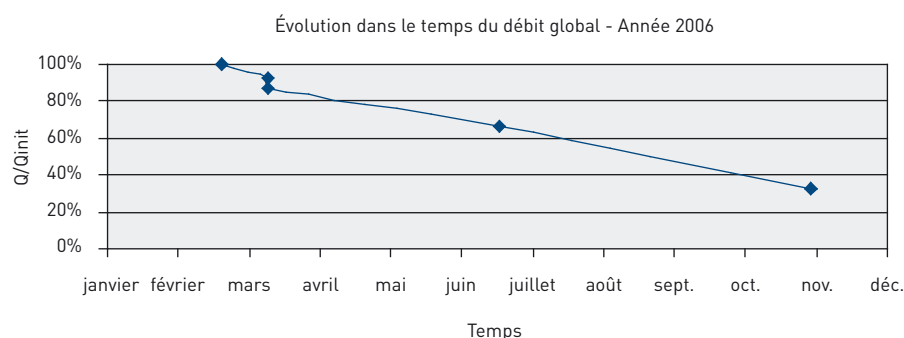
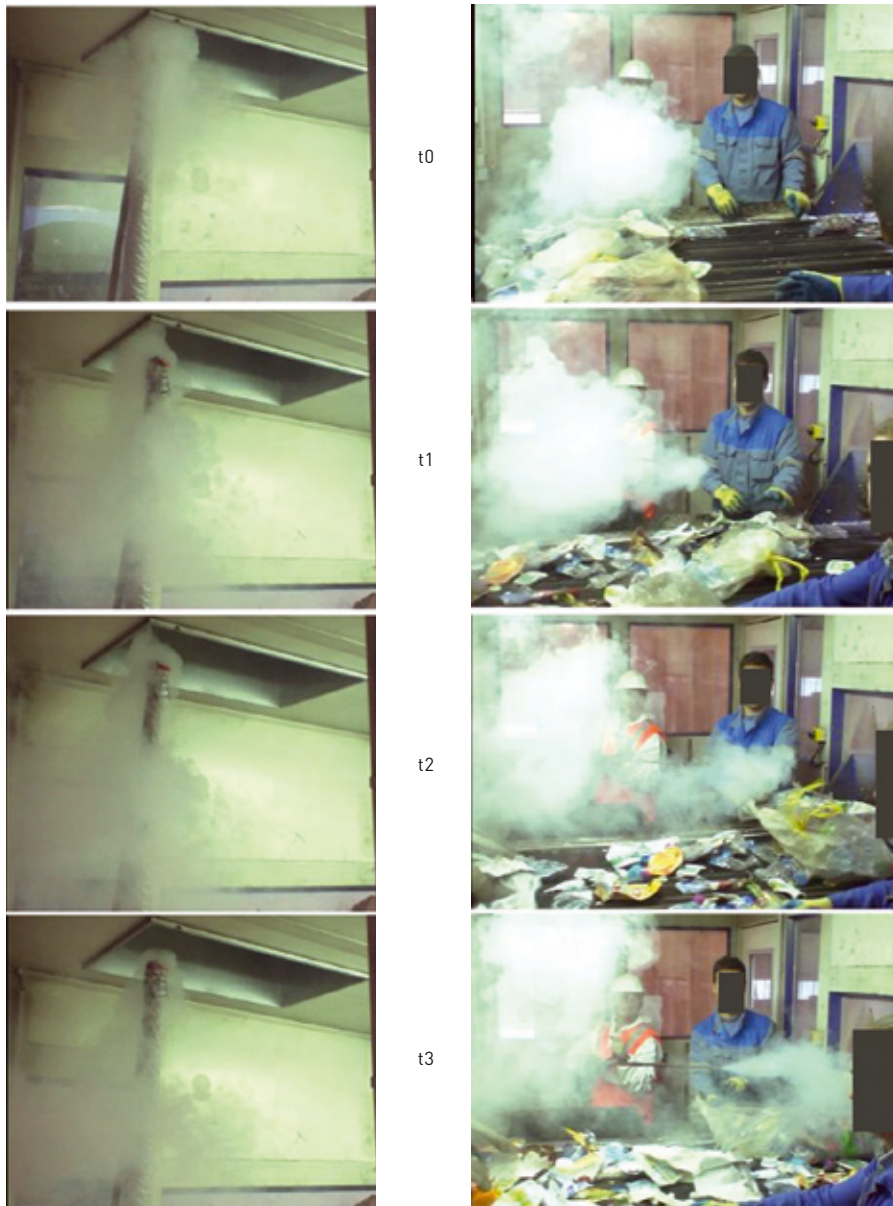




FIGURE 4

Visualisation des écoulements d'air en cabine 2 - Situation APRES modification



Cabine 2 - Sous plénum D4 - Débit : 600 m<sup>3</sup>/h - Température soufflage : 20,7°C  
Température au niveau des voies respiratoires : 18,0°C.

Les plénums mis en place semblent efficaces pour le débit préconisé de 600 m<sup>3</sup>/h mais une dégradation des performances est inéluctable avec la réduction des débits liée à l'encrassement du filtre de la CTA.

## AMBIANCE THERMIQUE

### Évolution des ambiances en fonction des conditions météorologiques

La Figure 5 précise les températures sèches de l'air mesurées au cours des différentes interventions, avant puis après modification de la ventilation.

#### En situation initiale

Pour une température sèche de l'air extérieur comprise entre 15 et 20°C, la température mesurée en cabine à 1,20 m

de hauteur est relativement constante avec des valeurs comprises entre 16 et 20°C.

Pour une température extérieure comprise entre 10 et 15°C, le dispositif de chauffage associé à la ventilation permet d'obtenir une température satisfaisante au poste de travail avec une valeur voisine de 20°C.

Pour une température extérieure inférieure à 5°C, il existe un fort gradient vertical de température, de 8 à 18°C par mètre de hauteur suivant les points considérés. Malgré une température de soufflage au diffuseur de l'ordre de 40°C, la température sèche de l'air, voisine de 14°C au poste de travail, est insuffisante.

Pour une température extérieure comprise entre 20 et 25°C, la CTA permet de gagner quelques degrés au poste de travail (par exemple : température extérieure de 24°C, température de soufflage de 18,2°C et température au poste de 22°C).

Par contre, elle devient inefficace pour une température extérieure supérieure à 25°C.

#### En situation finale

Pour une température sèche de l'air extérieur comprise entre 15 et 20°C, la température mesurée en cabine est de l'ordre de 20°C.

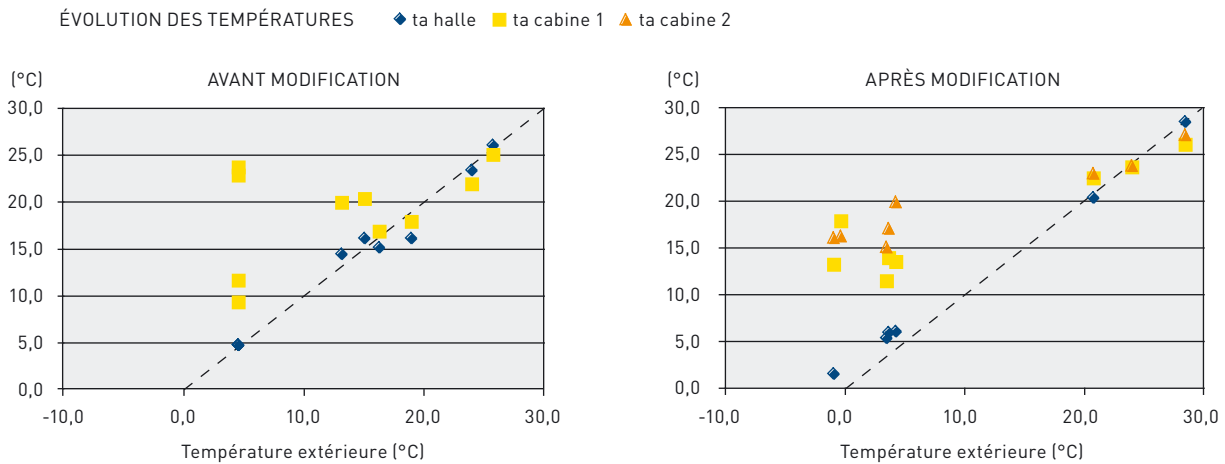
Pour une température extérieure inférieure à 5°C, la température sèche de l'air mesurée au poste de travail est comprise entre 10 et 20°C suivant la cabine et le poste considérés. Ces températures restent insuffisantes (pour y remédier, une épingle de chauffage additionnelle de 18 kW a été installée après les mesures).

Pour une température extérieure comprise entre 20 et 25°C, la température au poste est fonction du type de réglage adopté (centrale en mode chauffage ou en mode refroidissement) et s'en écarte de quelques degrés.

Lorsque la température extérieure excède 25°C, la climatisation est insuffisante ou le réglage est inadapté pour assurer une baisse significative des températures aux postes de trieurs dans les cabines. Au mieux, une réduction maximale de 4°C par rapport à la tempé-

FIGURE 5

Diagramme d'évolution des températures en fonction de la température extérieure  
 ta = température sèche de l'air



rature extérieure a été obtenue lorsque le débit de ventilation est correct (valeur supérieure à 600 m<sup>3</sup>/h).

**Remarques**

- Quelles que soient les conditions météorologiques relevées, l'humidité absolue mesurée dans les cabines est équivalente à celle de l'extérieur.
- La température moyenne de rayonnement dans la cabine est très voisine de la température sèche de l'air (les parois sont à la température ambiante).

**Évaluation du niveau de confort thermique**

Le métabolisme énergétique est estimé à 120 +/- 10 W/m<sup>2</sup> en cabine 1 et à 140 +/- 10 W/m<sup>2</sup> en cabine 2. L'isolement vestimentaire est estimé variable, de 0,5 +/- 0,05 clo\* en été à 0,75 +/- 0,05 clo en hiver.

Compte tenu de l'activité exercée, le confort thermique global est réalisable lorsque la température au poste de travail est maintenue à 20°C +/- 2,5°C (classe B de la norme correspondant à un PMV - vote moyen prévisible, cf. @nnexe - compris entre - 0,5 et 0,5).

**En situation initiale**

En matinée, pour une température extérieure de 24 à 25°C, la température moyenne enregistrée au poste de travail est comprise entre 21,8 et 22,8°C et le PMV s'échelonne entre 0,6 et 0,8.

L'après-midi, la température relevée au poste de travail est comprise entre 25 et 26°C et l'indice PMV atteint des valeurs comprises entre 1,15 et 1,30.

**En situation finale**

Pour une température extérieure de 0 à 2,5°C, l'indice PMV au poste de trieur se situe dans la plage généralement admise pour le confort avec des valeurs comprises entre - 0,5 et 0,5, avec une température moyenne au poste de travail qui se situe entre 18,5 et 21°C.

En période caniculaire, pour une température extérieure de 28,5 à 33,1°C, la CTA ne permet d'obtenir qu'un rafraîchissement relatif avec une température moyenne au poste de travail de l'ordre de 28°C et un indice PMV supérieur à 1,5.

La Figure 6 montre le niveau de confort thermique relevé à un poste de travail de la cabine 1.

**MESURES DE L'AÉROBIOCONTAMINATION**

Les prélèvements pour analyses microbiologiques ont été effectués à postes fixes en disposant, dans chaque cabine, les cassettes sur une rampe horizontale à hauteur des voies respiratoires des opérateurs et à l'emplacement habituellement occupé par le personnel, au bord du tapis (cf. Figure 1). Quelques mesures complémentaires ont également été effectuées en ambiance, en différents points du centre de tri.

La Figure 7 synthétise les résultats obtenus au cours des différentes interventions, avant puis après modification des installations de ventilation, et la Figure 8 présente la variabilité des résultats en fonction du point de prélèvement dans le centre de tri.

Les bactéries qui ont pu être identifiées appartiennent à la famille des *Entérobactéries*. Ce sont des germes largement répandus dans la nature (sol, eau, intestins de l'homme et de nombreuses espèces animales). Les souches isolées à l'occasion des prélèvements appartiennent aux espèces *Klebsiella oxytoca*, *Klebsiella pneumoniae*, *Serratia liquefaciens*, *Pantoea spp.*, *Proteus vulgaris*, *Providencia rettgeri*. Certaines de ces espèces sont des hôtes classiques de l'homme (peau, tractus digestif, etc.)

\* Le clo est une unité mesurant l'isolement thermique procuré par un vêtement.  
 1 clo = 0,155 K m<sup>2</sup>/W.

FIGURE 6

Évolution dans le temps de l'indice de confort thermique PMV, niveaux des températures et des débits de ventilation au moment des mesures de confort en cabine 1

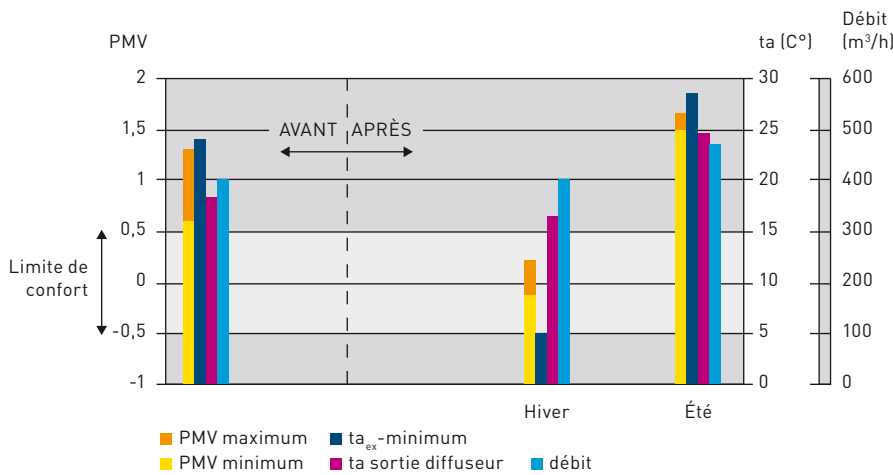
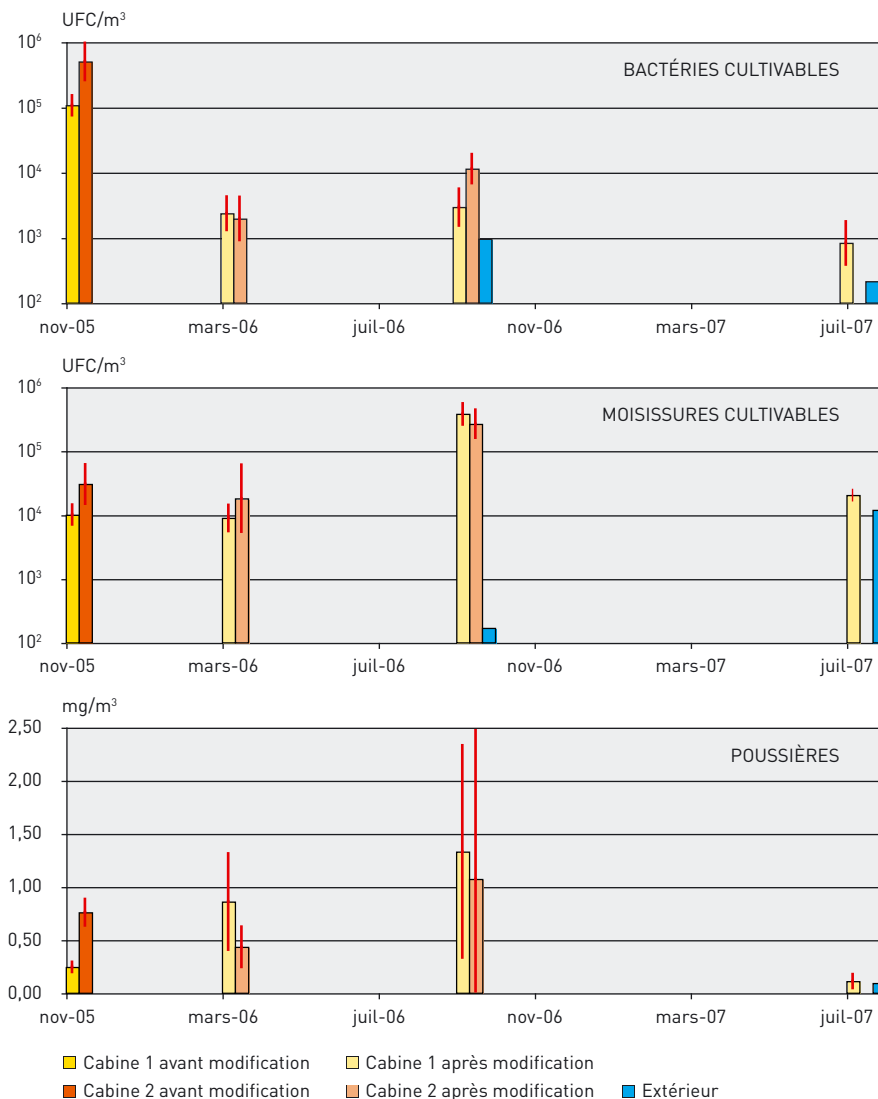


FIGURE 7

Évolution dans le temps de la concentration moyenne en microorganismes dans l'air au poste de travail. Les barres représentent l'intervalle de confiance à 95 %



et peuvent se développer sur de la matière organique dans le milieu extérieur. Ces bactéries sont vraisemblablement présentes dans les ordures ménagères d'où elles peuvent contaminer l'air. La plupart des espèces isolées peuvent être impliquées, rarement, dans des infections opportunistes variées (atteintes pulmonaires, troubles intestinaux, etc.). Un autre groupe de microorganismes, les *Actinomycètes*, a également été isolé. Ces microorganismes sont souvent isolés dans l'environnement. Toutefois, en l'absence d'une identification précise, il n'est pas possible de tirer de conclusion concernant la source d'*Actinomycètes* dans l'environnement étudié.

Dans la configuration initiale, les concentrations en bactéries ou en moisissures cultivables relevées aux postes de travail sont comprises entre  $10^4$  et  $10^6$  UFC/m<sup>3</sup>. La concentration en poussières varie suivant le point de prélèvement considéré entre 0,2 et 0,9 mg/m<sup>3</sup>.

Après modification des installations de ventilation, les concentrations relevées aux postes de travail sont très variables dans l'espace et dans le temps et certaines valeurs relevées peuvent effectivement dépasser celles obtenues en situation initiale.

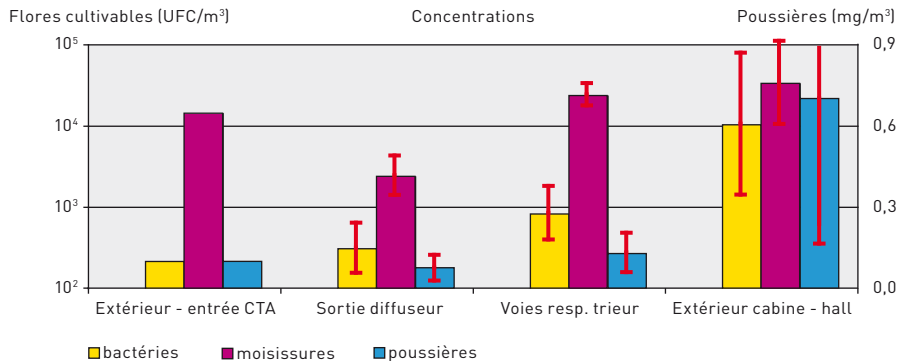
Néanmoins, malgré un empoussièrément plus important, les concentrations en bactéries ou en moisissures cultivables relevées aux postes de travail immédiatement après l'installation des plénums sont inférieures aux concentrations enregistrées initialement, dans un rapport compris entre 2 et 10 pour les moisissures et entre 20 et plus de 200 dans le cas des bactéries.

Puis, une nette dégradation des résultats est observée sur la série de mesures suivantes. Cette dégradation est certainement consécutive à une efficacité moindre du plénum de ventilation alimenté par un débit de ventilation insuffisant.

La dernière série de mesures effectuée après un contrôle de conformité du débit de ventilation permet de confirmer cette hypothèse. Les concentrations obtenues sont très nettement en recul par rapport à celles observées lors de la campagne précédente (par exemple, rapport de 5 pour les concentrations moyennes en bactéries).

FIGURE 8

Mesures de la concentration moyenne en microorganismes et en poussières dans l'air, à la sortie du diffuseur, à hauteur des voies respiratoires et en différents points de l'entreprise. Les barres représentent l'intervalle de confiance à 95 %.



De plus, la comparaison entre les mesures effectuées au poste de trieur et celles effectuées à l'extérieur de la cabine ou dans le hall montre que le dispositif de ventilation proposé :

- permet effectivement d'introduire de l'air dont la qualité est équivalente à celle existant à l'extérieur du local (comparaison entre les mesures en sortie de diffuseur et à l'extérieur ou l'entrée de la CTA) ;

- qu'une légère dégradation en termes de qualité de l'air peut être observée entre les mesures au niveau des voies respiratoires du trieur et celles en sortie de diffuseur mais que, quelle que soit la grandeur considérée, le niveau obtenu en termes de concentration reste néanmoins équivalent à celui relevé à l'extérieur ;

- permet d'éviter une pollution en provenance du hall du centre de tri (les mesures ont été effectuées avec deux portes de la cabine ouvertes durant toute la durée du prélèvement) avec, par exemple, un facteur minimum de 5 entre les concentrations en poussières et un facteur de 20 pour les concentrations en bactéries (rapport entre les concentrations dans le hall et les concentrations au poste).

## DISCUSSION - CONCLUSION

Des mesures effectuées sur site avant puis après mise en place de plénums de soufflage aux postes de travail, il ressort que, du point de vue ambiance thermique, les deux systèmes de ventilation étudiés - par mélange et par plénums de soufflage - donnent des résultats équivalents pour le confort global, avec un indice directement lié à la performance de la CTA, de la régulation (points de consigne, par exemple) et de l'entretien.

Les dispositifs de chauffage, de refroidissement et de régulation mis en œuvre dans cette étude ne permettent d'obtenir un niveau de confort acceptable que pour une plage relativement étroite des températures extérieures, comprise entre 10 et 25°C.

En dessous de 10°C ou au-dessus de 25°C, le confort ne peut être assuré globalement ou localement (gradient vertical de température trop important).

Un effort doit être effectué au niveau de la conception thermique de ces cabines et des installations. L'isolation doit être renforcée, les ouvertures minimisées et un chauffage d'appoint permettant de compenser en hiver les déperditions par les parois doit être prévu.

Les visualisations fumigène réalisées juste après modification des ins-

tallations montrent l'intérêt d'utiliser le système de diffusion d'air préconisé : absence de remontée d'air dans les gouttes, zone des voies respiratoires du salarié alimentée en air en provenance direct du diffuseur. Cette analyse est confirmée par la comparaison entre les concentrations en bactéries ou en moisissures mesurées au poste de travail avant et après installation des plénums de ventilation.

Une détérioration des résultats est observée lorsque le débit minimal de ventilation préconisé de 600 m³/h par diffuseur n'est pas conservé ou lorsque le gradient de température entre l'air introduit et l'ambiance devient trop important, la limite se situant pour ce type d'installation à un écart maximal d'environ 3°C.

Lorsque les conditions normales de fonctionnement des installations de ventilation sont respectées, le dispositif de ventilation à plénum soufflant préconisé dans le guide de conception des centres de tri de l'INRS [12] permet effectivement un apport d'air neuf au poste de trieur. Dans ce cas, les indicateurs de qualité de l'air retenus (concentrations en poussières, en bactéries ou en moisissures) donnent des valeurs voisines de celles relevées dans l'air extérieur.

Pour y parvenir, il est donc indispensable de :

- s'assurer du bon positionnement des prises d'air extérieur,
- vérifier régulièrement les débits de ventilation et entretenir correctement la centrale de traitement d'air et le réseau de distribution,
- choisir des diffuseurs adaptés et les positionner correctement au-dessus du poste de trieur,
- prévoir un chauffage additionnel de façon à conserver en hiver un écart maximum de 3°C entre la température de soufflage et l'ambiance,
- maintenir la cabine en surpression par rapport au hall extérieur.

Reçu le : 09/02/2009

Accepté le : 17/03/2009



### POINTS À RETENIR

- Le dispositif de ventilation à plénum soufflant permet un apport d'air neuf au poste de trieur.
- La qualité de l'air mesurée sous le plénum est voisine de celle relevée dans l'air extérieur (indicateurs retenus : concentrations en poussières, en bactéries et en moisissures).
- Du point de vue niveau de confort thermique, les deux systèmes de ventilation - par mélange et par plénums de soufflage - donnent des résultats équivalents.
- Il est indispensable de vérifier régulièrement les débits de ventilation et d'entretenir correctement la centrale de traitement d'air et le réseau de distribution.

@*nnexe* : retrouvez l'annexe dans la version électronique (PDF) de cet article sur notre site [www.hst.fr](http://www.hst.fr)

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] ITOM, Les installations de traitement des ordures ménagères - Résultats 2004. ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie, Juillet 2006.
- [2] DUCLOS G., PERRIER-ROSSETA., CARRÉ J. – Les risques sanitaires liés au tri des déchets. TSM, 1998, N° 10, Octobre 1998.
- [3] LAVOIE J., GUERTIN S. – Évaluation des risques à la santé et à la sécurité du travail dans les centres de tri de matières recyclables. 1999, IRSST, Rapport 212, Montréal, Québec, pp. 82.
- [4] MALMROS P., SIGSGAARD T., BACH T. – Occupational health problems due to garbage sorting. *Waste management Research*, 1992, 10, pp. 227-234.
- [5] POULSEN O.M., BREUM N.O., EBBEHOJ N., HANSEN A.M. *et al.* – Review of occupational health problems and their possible causes. *The Science of the Total Environment*, 1995, 168, 1, pp. 33-56.
- [6] POULSEN O.M., BREUM N.O., EBBEHOJ N., HANSEN A.M. *et al.* – Collection of domestic waste. Review of occupational health problems and their possible causes. *The Science of the Total Environment*, 1995, 170, 1-2, pp. 1-19.
- [7] SIGSGAARD T., MALMROS P., NERSTING L., PETERSEN C. – Respiratory disorders and atopy in Danish resource recovery workers. *Canadian journal of microbiology*, 1992, pp. 1-24.
- [8] Cercle National du Recyclage – Concevoir et exploiter un centre de tri des déchets recyclables. 2001, Lille.
- [9] LAVOIE J., GUERTIN S. – Evaluation of health and safety risks in municipal solid waste recycling plants. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2001, 51, pp. 352-369.
- [10] PERDRIX A., PARAT S., GLOUX E., MAÎTRE A. – Les risques microbiologiques dans les filières de traitement de déchets ménagers. *Archives des maladies professionnelles*, 2002, 63, pp. 183-184.
- [11] STOKLOV M., PARAT S., PERDRIX A., MAÎTRE A. – Emissions toxiques et microbiologiques d'un centre de tri d'ordures ménagères. *Archives des maladies professionnelles*, 2002, 63, pp. 187-188.
- [12] INRS – Conception des centres de tri des déchets. Déchets ménagers et assimilés issus de la collecte sélective. ED 914, juillet 2005.
- [13] Eco-Emballages, Concevoir, construire et exploiter un centre de tri. Editions 2005.
- [14] DOUWES J., THORNE P., PEARCE N., HEEDERIK D. – Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2003, 47, 3, pp. 187-200.
- [15] NEUMANN H.D., BALFANZ J., BECKER G., LOHMEYER M. *et al.* – Bioaerosol exposure during refuse collection: results of field studies in the real-life situation. *The Science of the Total Environment*, 2002, 293, 1-3, pp. 219-231.
- [16] NIELSEN E.M., BREUM N.O., NIELSEN B.H., WURTZ H. *et al.* – Bioaerosols exposure in waste collection: A comparative study on the significance of collection equipment, type of waste and seasonal variation. *The Annals of occupational hygiene*, 1997, 41, 3, pp. 325-344.
- [17] RECORD – État des connaissances sur les microorganismes dans la filière déchets (060657-1A). 2003.
- [18] CAREPS – Étude bibliographique sur l'évaluation des risques liés aux bioaérosols générés par le compostage des déchets, ADEME, 2002, pp. 1-216.
- [19] GLADDING T., THORN J., STOTT D. – Organic dust exposure and work-related effects among recycling workers. *American Journal of Industrial Medicine*, 2003, 43, 6, pp. 584-591.
- [20] HELDALK.K., HALSTENSEN A.S., THORN J., DJUPESLAND P. *et al.* – Upper airway inflammation in waste handlers exposed to bioaerosols. *Occupational and Environmental Medicine*, 2003, 60, 6, pp. 444-450.
- [21] KENNEDY S.M., COPES R., BARTLETT K.H., BRAUER M. – Point-of-sale glass bottle recycling: indoor airborne exposures and symptoms among employees. *Occupational and Environmental Medicine*, 2004, 61, 7, pp. 628-635.
- [22] FUNG F., HUGHSON W.G. – Health effects of indoor fungal bioaerosol exposure. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 2003, 18, 7, pp. 535-544.
- [23] LAFON D. – Hygiène et santé dans la filière déchets. *Documents pour le Médecin du travail*, 4<sup>e</sup> trimestre 2000, 84, pp. 409-413.
- [24] ROSENBERG N. – Affections respiratoires non infectieuses professionnelles liées aux agents biologiques : secteur des déchets, tri et valorisation. *Documents pour le Médecin du travail*, 2<sup>e</sup> trimestre 2007, 110, pp. 229-236.
- [25] DOUWES J. – (1-3)- $\beta$ -D-glucans and respiratory health: a review of the scientific evidence. *Indoor air*, 2005, 15, 3, pp. 160-169.
- [26] SIGSGAARD T., BONEFELD-JORGENSEN E.C., HOFFMANN H.J., BONLOKKE J. *et al.* – Microbial cell wall agents as an occupational hazard (Living in a Safe Chemical World. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Congress of Toxicology 11-15 July, 2004, Tampere, Finland). *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2005, 207, 2, Supplement 1, pp. 310-319.
- [27] GOYER N., LAVOIE J., LAZURE L., MARCHAND G. – Les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention, in *Guide technique de l'IRSST*. 2001, IRSST, Montréal. p. 85.
- [28] RAPP R., HENRY F., FONTAINE J.R. – Diffusion de l'air dans les salles de tri des centres de traitement des ordures ménagères. Étude des caractéristiques aérauliques de quatre dispositifs d'introduction de l'air. *Hygiène et sécurité du travail*, 210, 1<sup>er</sup> trimestre 2008, 2283, pp 15-24.

## @nnexe

### MATÉRIELS ET MÉTHODES

#### La ventilation

Les mesures des débits de ventilation sont effectuées aux introductions mécaniques de l'air par un balomètre de marque TSI, dispositif permettant de mesurer la vitesse moyenne de l'air se déplaçant au travers d'une section constante connue.

La visualisation des écoulements d'air est observée à l'aide d'un fumigène avec enregistrement par une caméra numérique.

Des mesures de températures sont effectuées ponctuellement en différents endroits de la cabine ou à l'extérieur (psychromètre Ahlborn Almeno 2290).

#### L'ambiance du point de vue thermique

Le niveau de confort thermique est estimé à l'aide des indices PMV (vote moyen prévisible) et PPD (pourcentage de personnes insatisfaites par l'ambiance) suivant la norme ISO 7730.

Le PMV exprime le vote moyen d'un très grand nombre de personnes soumises à la même ambiance suivant une échelle comprise entre - 3 (sensation de froid) à + 3 (sensation de chaud) avec la neutralité à 0.

Le PMV se calcule à partir des quatre paramètres physiques caractéristiques d'un environnement climatique (température sèche de l'air, température moyenne de rayonnement, vitesse de l'air et humidité absolue de l'air) ainsi que de l'activité (métabolisme énergétique) et de la tenue vestimentaire.

L'indice PPD est fonction du PMV. Il indique le pourcentage de personnes non satisfaites par l'ambiance, avec une valeur minimale de 5 %. Selon la norme ISO 7730, les conditions de confort sont respectées lorsque le PMV est compris entre - 0,5 et + 0,5.

La mesure des paramètres climatiques est effectuée à l'aide d'un analyseur d'ambiance climatique d'intérieur de marque Bruel et Kjaer type 1213 équipé des

capteurs MM 0034 (température d'air), MM 0037 (humidité), MM 0038 (vitesse d'air), MM 0036 (température plane de rayonnement) avec enregistrement et stockage des valeurs sur un PC portable.

Des mesures complémentaires en températures et en humidité sont effectuées à l'aide d'un psychromètre AHLBORN type 2290-4.

#### Mesures des bioaérosols

Les prélèvements d'air ont été effectués avec des dispositifs identiques dans les deux cabines de pré-tri, avant et après les travaux visant à modifier la ventilation.

#### Méthodes d'échantillonnage par filtration

L'échantillonnage a été effectué par filtration de l'air à l'aide de cassettes porte-filtre en polypropylène de 37 mm de diamètre et constituées de 3 pièces (Millipore, France). Pour l'échantillonnage, les cassettes fermées étaient chacune connectée à une pompe (PAE, INRS) par l'intermédiaire d'un col sonique spécialement usiné à cette occasion pour assurer un débit nominal moyen d'environ 2 L/min. La durée de prélèvement était de une à deux heures pour l'ensemble des échantillons prélevés. Chaque cassette contenait un tampon (Absorbant pads, Millipore, France) et une membrane en polycarbonate de 37 mm de diamètre et de pores de 0,8 µm (Nuclepore® Polycarbonate, Corning, France).

#### Stratégie d'échantillonnage par filtration

Un dispositif a été utilisé pour mesurer l'aérobiocontamination au poste de travail à plusieurs reprises dans l'année. L'échantillonnage a été effectué à poste fixe en disposant de façon alternée, sur une rampe et espacées de 10 cm les unes des autres, trois cassettes destinées aux analyses microbiologiques et trois cassettes destinées aux analyses gravimétriques. La rampe a été fixée à une potence reposant sur le plancher de la cabine, à une hauteur de 1,70 m du sol, au poste de tri et au bord du tapis. Les orifices des cassettes étaient tournés horizontalement vers le tapis roulant en activité (*cf. Figure 1*).

Pour les besoins spécifiques d'une étude, un autre dispositif a été utilisé permettant de placer une rampe à 1,70 m du sol et une autre à 2,75 m du sol sous le plénum soufflant (à la sortie du diffuseur). Les échantillons ont été transportés dans la journée au laboratoire dans une enceinte réfrigérée à une température de 4°C.

#### Analyses

Les analyses (poussières, flore cultivable) ont été effectuées au plus tard 24 heures après le prélèvement.

Les mesures pondérales de poussières ont été effectuées sur les échantillons contenant les membranes en polycarbonate. Les membranes utilisées dans ces cassettes ont été pesées avant et après prélèvement à l'aide d'une balance de précision à 1 µg (MX5, Mettler-Toledo, Suisse). La quantité de poussières dans un échantillon a été obtenue en retranchant la masse de chaque membrane après le prélèvement à celle obtenue avant le prélèvement.

Les échantillons destinés au dénombrement des flores cultivables ont été analysés de la manière suivante :

##### ■ Pré-traitement des filtres

Les échantillons destinés aux analyses microbiologiques ont subi une étape d'extraction. Pour cette extraction, un volume de 10 ml de la solution d'extraction (Tween 80 : 0,1 g/L, Peptone : 1,0 g/L, Eau purifiée de type 2) a été introduit dans chaque cassette. Puis, toutes les cassettes ont été agitées simultanément pendant 20 minutes à 2 000 rpm (Multi-Reax®, Heildolph). L'extrait a ensuite été dilué successivement au 1/10e dans de l'eau physiologique stérile (NaCl : 8,5 g/L ; Tryptone : 1 g/L ; pH = 7,0). Le dénombrement a été effectué en étalant 100 µl de chaque dilution sur des boîtes contenant le milieu de culture approprié.

##### ■ Milieux et conditions d'incubation

Le milieu à l'Extrait de Malt (MEA) a été utilisé pour le dénombrement des moisissures et les boîtes ont été incubées à 25°C pendant 5 jours. Pour le

dénombrement des bactéries, le milieu Tryptone Soja Agar (TSA) amandé de 0,08 g/l d'actidione a été utilisé et les boîtes ont été incubées à 37°C pendant 3 jours. Le nombre de colonies sur les boîtes a été évalué tous les jours pour déterminer la concentration microbienne dans l'extrait puis sur le filtre.

Les résultats ont été exprimés en Unité formant colonie (UFC) ou milligramme (mg) par mètre cube d'air prélevé.