

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SECURITE
Centre de Recherche
Département "Environnement Physique"
Service "Thermique, Ventilation, Eclairage"
Avenue de Bourgogne
B.P. 27
54501 Vandoeuvre Cédex FRANCE

Projet de Publication n° 1340

Avril 1987

APPLICATION DE LA TECHNIQUE DE TRACAGE POUR L'EVALUATION DES
VENTILATIONS LOCALE ET GENERALE D'UN ATELIER - ETUDE DE CAS

A. LEFEVRE
J.P. MULLER

"Document diffusé pour raison de service aux services publics et aux instances de la Sécurité Sociale mandatées pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles. Il peut être utilisé par eux, sans réserve, comme document de travail interne ou pour des réunions qu'ils provoqueraient. Il ne peut, en revanche, être placé en l'état dans les circuits documentaires car il fera ultérieurement l'objet d'une publication dans une revue".

● Diffusion externe :

- C.N.A.M.(2)
- C.R.A.M.(2)
- C.G.S.S.(2)
- Ministère des Affaires Sociales et de la Solidarité Nationale (DRT - DSS)
- Directions Régionales du Travail et de la Main d'Oeuvre

● Diffusion interne :

- P / DG - DER - ETA - EG - INF - DN - FOR - SM
- N / DER - DS - DN - EP - Chrono

"AIR DISTRIBUTION IN VENTILATED SPACES"

International Conference

Stockholm 10-12 juin 1987

APPLICATION DE LA TECHNIQUE DE TRACAGE POUR L'EVALUATION DES VENTILATIONS LOCALE ET GENERALE D'UN ATELIER - ETUDE DE CAS

A. LEFEVRE - J.P. MULLER

Service Thermique, Ventilation, Eclairage, INRS, avenue de Bourgogne, B.P. 27, 54501 Vandoeuvre Cédex, France

INTRODUCTION

Le contrôle de la ventilation d'un local de travail passe par la connaissance des débits d'air mis en oeuvre, de l'efficacité de captage des dispositifs d'aspiration localisée, des performances de la ventilation générale et de l'évaluation des débits sources en polluants réels émis par les processus de fabrication.

En milieu industriel, les mesures classiques permettant de caractériser la ventilation sont souvent difficiles de mise en oeuvre (mesures de vitesses d'air, de pression, prélèvements d'atmosphère).

L'emploi de méthodes de mesure par gaz traceur en remplacement des méthodes classiques rend le contrôle de la ventilation plus aisé du fait :

- de la maîtrise possible de l'émission ;
- de la facilité du prélèvement du traceur ;
- de l'absence d'interférences avec une pollution provenant de postes voisins ;
- de la possibilité de reproduire plusieurs fois les mêmes conditions d'essais.

OBJECTIFS

Les travaux faisant l'objet de cette publication ont eu pour objectifs :

- d'appliquer sur site, dans un atelier de la deuxième transformation du bois, les techniques de traçage afin de faire un bilan global de la ventilation par l'évaluation de l'efficacité de captage des dispositifs d'aspiration localisée implantés sur les machines et des performances de la ventilation générale ;
- de montrer la faisabilité de l'évaluation des débits sources en polluants réels en couplant des mesures de concentration de gaz traceur et de polluants réels en un même point. Ainsi, connaissant l'efficacité de captage d'un dispositif d'aspiration localisée sur une machine et le débit source en polluants réels de celle-ci, il est ainsi possible de prévoir sa contribution à la pollution du poste de travail et du local.

La figure 1 schématise un local avec ses circuits de ventilation et les points de génération et de prélèvement du gaz traceur.

Le tableau 1 précise où doivent se faire les générations et les prélèvements de gaz traceur pour quantifier les débits d'air, les efficacités de captage et les performances de la ventilation générale.

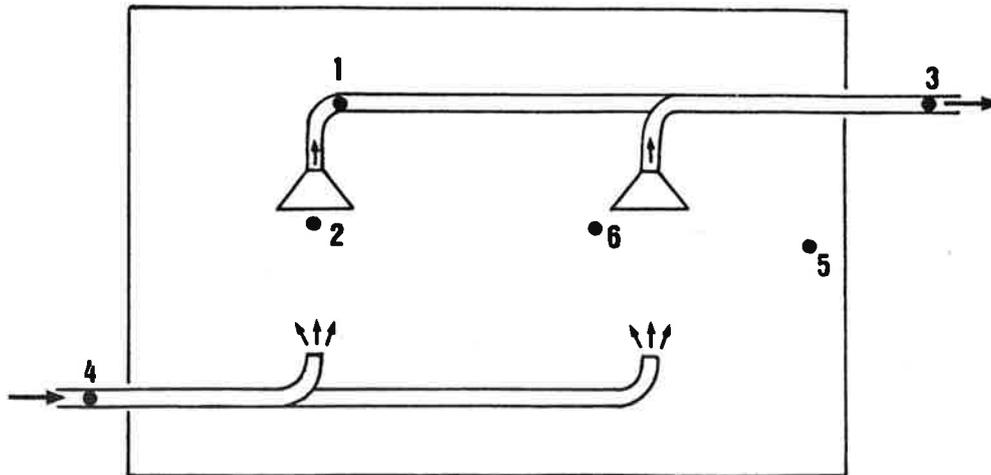


Figure 1 : Schéma d'un local avec ses circuits de ventilation et les points de génération et de prélèvement du gaz traceur

Paramètres		Points de Génération	Prélèvement
Débit d'air : Q		1	3
Efficacité de captage : α		1 et 2	3
Ventilation générale	Efficacité de la distribution d'air : η	4	3 et 5
	Performance de la ventilation : ϵ	6	3 et 5

Tableau 1 : Points de génération et de prélèvement du traceur en fonction des paramètres à déterminer

DESCRIPTION DE L'ATELIER

L'atelier de l'industrie de la deuxième transformation du bois, retenu pour l'étude des ventilations locale et générale, est équipé de deux systèmes de ventilation distincts.

Il s'agit :

- d'un circuit d'introduction composé de deux gaines permettant une distribution équilibrée de l'air neuf en partie haute de l'atelier ;
- d'un circuit d'extraction composé de trois réseaux de gaines auxquels sont raccordées toutes les machines disséminées dans l'atelier. Deux dépoussiéreurs assurent la filtration de l'air aspiré.

Une trentaine de machines équipent cet atelier. La figure 2 en donne l'implantation. Les repères (a) à (i) correspondent aux machines sur lesquelles l'efficacité du captage local a été mesurée. Les repères (1) à (6) indiquent les différents points du local choisis pour l'étude des performances de la ventilation générale, auxquels il faut ajouter les machines (f) et (i à l).

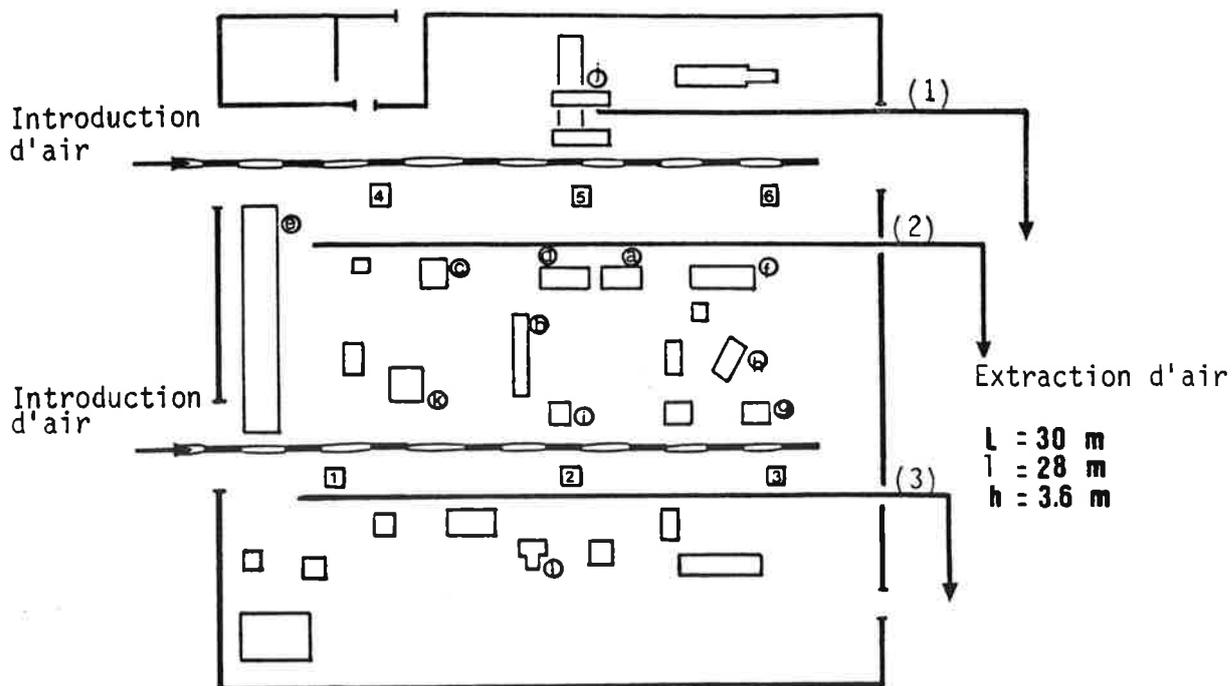


Figure 2 : Schéma de l'atelier précisant l'implantation des machines et des points de mesures

Le tableau n° 2 donne la correspondance entre le repère et le nom de la machine.

Type de machine	Repère
Tour à bois	a
Ponceuse à bande étroite	b
Ponceuse à axe vertical	c
Tour de ponçage	d
Affleureuse	e
Toupie double	f
Raboteuse	g
Dégauchisseuse	h
Toupie simple	i
Calibreuse	j
Ponceuse large bande	k
Défonceuse	l

Tableau 2 : Liste des machines ayant servi à l'étude

TECHNIQUES ET APPAREILLAGES DE MESURES

Technique de traçage

La technique de traçage consiste à simuler la génération des polluants réels par un traceur dont on maîtrise les conditions d'émission, de prélèvement et d'analyse.

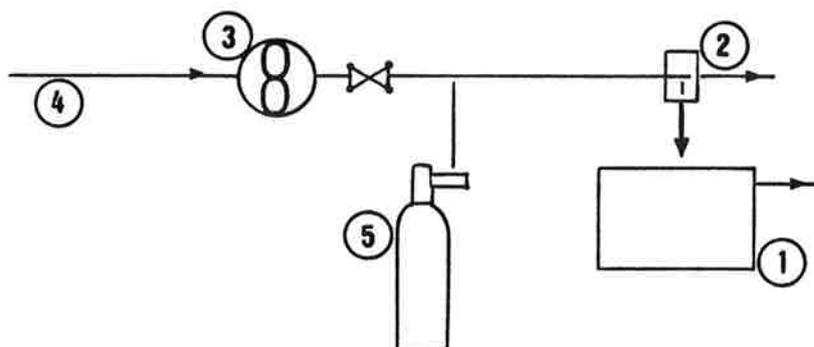
Le gaz utilisé pour cette technique doit être non toxique, chimiquement stable et facilement mesurable. Compte tenu des contraintes liées aux mesures en laboratoire ou sur le terrain et en fonction des critères établis, l'hélium a été retenu comme traceur par l'INRS [1].

La figure 3 présente le synoptique détaillé des appareillages utilisés lors des essais.

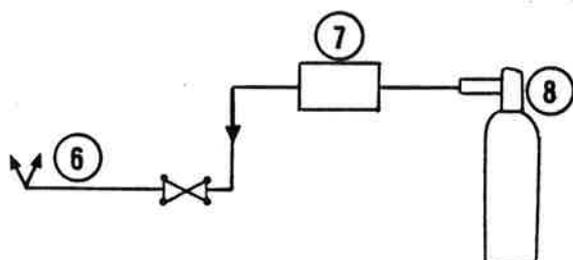
Une sonde raccordée à une pompe prélève un échantillon "air-hélium" dans la conduite de ventilation à environ 80 diamètres du point d'émission ou directement en certains points caractéristiques des postes de travail et/ou de l'atelier. Le spectromètre de masse assure la mesure de la concentration du traceur dans le flux prélevé. Cet appareil délivre, en continu, un signal électrique proportionnel à la concentration.

Dans les configurations étudiées, le traceur provenant d'une bouteille sous pression et passant par un débitmètre est généré à partir d'un émetteur (bronze fritté ou tube diffusant de façon hémisphérique ou par jet).

Dispositif de prélèvement et de mesure



Dispositif de génération du traceur



- 1 - Spectromètre de masse
- 2 - Tête de prélèvement
- 3 - Pompe
- 4 - Sonde de prélèvement
- 5 - Bouteille d'hélium étalon
- 6 - Sonde d'introduction d'hélium
- 7 - Débitmètre
- 8 - Bouteille d'hélium pur

Figure 3 : Appareillage de mesure pour la technique de gaz traceur

- Le traceur peut être généré de deux façons différentes :
- génération en continu : il permet alors d'exploiter :
 - . les croissances et décroissances des concentrations du gaz traceur en fonction du temps ;
 - . les concentrations en régime d'équilibre.
 - génération impulsionnelle : il permet d'étudier l'évolution de la concentration du traceur en différents points du local en s'affranchissant des échanges possibles entre les zones "sous-ventilées" et les zones "sur-ventilées".

Prélèvements d'atmosphère

Les prélèvements d'atmosphère permettent d'évaluer les niveaux de concentrations particulières en différents points d'un local et de déterminer les spectres granulométriques des polluants prélevés.

Les mesures ont été effectuées à l'aide d'appareils de prélèvements équipés :

- de cassettes ouvertes \varnothing 37 mm pour déterminer les spectres granulométriques des poussières de bois (débit de prélèvement $\sim 2,5$ m³/h) ;
- de filtres \varnothing 90 mm pour déterminer les concentrations pondérales (débit de prélèvement ~ 9 m³/h).

1 - EFFICACITE DE CAPTAGE LOCALISE ET DEBIT D'AIR D'UN DISPOSITIF D'ASPIRATION LOCALISE

L'évaluation de l'efficacité de captage de dispositifs d'aspiration localisée, à l'aide d'un gaz traceur, a fait l'objet de quelques travaux antérieurs. FARANT, MAC KINNON [2] ont comparé différentes méthodes pouvant être utilisées et proposent une démarche à suivre pour effectuer les mesures dans de bonnes conditions. FLYNN, ELLENBECKER [3] ont effectué une approche théorique de l'efficacité de captage suivie d'une validation en laboratoire sur une hotte d'aspiration. HAMPL, NIEMELÄ [4] ont étudié l'influence de différents paramètres sur le mélange du gaz traceur avec l'air dans les conduites (longueur de bons mélanges, singularités, isocinétisme). ELLENBECKER, ROBERT [5], VAVASSEUR, MULLER et AUBERTIN [1] ont appliqué la technique de traçage sur site.

L'évaluation des débits d'air dans des conduites fermées fait l'objet d'une norme ISO (ISO 4053/1.1977 : Mesure de débits d'air dans les conduites fermées - Généralités).

1.1 - Méthode d'évaluation

L'efficacité de captage α d'un système d'aspiration est définie comme le rapport du débit massique de polluant directement capté (\dot{m}_c) au débit massique de polluant émis (\dot{m}_e) :

$$\alpha = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_e} \times 100 (\%)$$

La mesure des débits massiques peut être ramenée à des mesures de concentrations dans le conduit d'aspiration :

$$\dot{m}_e = Q_{e1} (\overline{C}_1 - \overline{C}_0) \text{ et } \dot{m}_c = Q'_{e1} (\overline{C}_2 - \overline{C}_0)$$

Q_{e1} et Q'_{e1} = débit d'air extrait par le dispositif de captage 1 (m³/s)

\overline{C}_0 = concentration moyenne du traceur en ambiance en l'absence de toute génération (ppm)

\overline{C}_1 = concentration moyenne du traceur dans la conduite d'aspiration lorsqu'il est totalement généré dans celle-ci ; point 1 (concentration de référence) (ppm)

\overline{C}_2 = concentration moyenne du traceur dans la conduite lorsque celui-ci est généré en un point du poste de travail (point 2) et simule l'émission du polluant (mesure en configuration de travail) (ppm)

\dot{q}_{He} = débit volume du gaz traceur (m³/h)

Lorsque les débits d'aspiration Q_{e1} et Q'_{e1} sont égaux et constants, l'efficacité peut se calculer à partir de la relation suivante :

$$\alpha = \frac{\overline{C}_2 - \overline{C}_0}{\overline{C}_1 - \overline{C}_0} \times 100 (\%)$$

Pour mesurer la concentration \overline{C}_2 , on considère que le débit du traceur passe soudainement d'un débit nul à un débit \dot{q}_{He} (échelon). La concentration \overline{C}_2 augmente alors progressivement en fonction du temps. La courbe d'évolution de \overline{C}_2 fait apparaître schématiquement deux constantes de temps :

- la première, relativement courte, correspond à l'accumulation du traceur dans le volume directement sous influence du système de captage ;
- la seconde, plus longue, correspond à l'accumulation du traceur dans le reste du local. Une partie du traceur échappant à la zone d'influence du système de captage est secondairement et indirectement captée.

L'efficacité d'un système reposant sur le concept de polluant directement capté, on définit l'efficacité sur la base de la détermination de la valeur de \overline{C}_2 obtenue lors du premier régime d'équilibre correspondant à la première constante de temps. En pratique, et sauf dans le cas de très petits locaux, la constante de temps du local est beaucoup plus importante que la constante de temps du système de captage, si bien que l'on peut quantifier cette concentration \overline{C}_2 en moyennant les valeurs mesurées sur un temps de quelques minutes après l'obtention du premier régime d'équilibre.

La mesure de la concentration de référence $\overline{C_1}$ (traceur généré en totalité dans la conduite) permet de calculer le débit d'air aspiré Q_e dans la conduite à partir de la relation suivante :

$$Q_e = \frac{\dot{q}_{He}}{(\overline{C_1} - \overline{C_0}) \cdot 10^{-6} \times 3600} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Ces mesures de débit sont effectuées conformément à la norme ISO 4053/1.1977.

1.2 - Résultats de mesures

L'étude a porté sur 9 machines implantées dans l'atelier et considérées comme représentatives des machines rencontrées dans l'industrie du bois. Le tableau 3 donne, pour chaque machine, les débits d'air extraits et les efficacités de captage mesurés.

Machines (repère)	Concentration en traceur		Débit d'air	Efficacité de captage
	$\overline{C_1}$ (ppm)	$\overline{C_2}$ (ppm)	Q_e (m ³ /s)	α (%)
a	179	170	0,48	95
b	137	122	0,63	88,6
c	337	305	0,25	90,3
	167	167	0,51	100
d	207	207	0,41	100
e	118	116	0,55	98,2
	114	110	0,77	96,2
	163	159	0,53	97,5
f	95	93	0,93	97,7
g	143	141	0,60	98,5
h	131	131	0,66	100
i	90	86	0,6	95,2

Nota : Débit du gaz traceur durant tous les essais : $\dot{q}_{He} = 0,3 \text{ m}^3/\text{h}$
 La concentration moyenne en gaz traceur dans l'air, sans génération, est pour tous les essais : $\overline{C_0} = 5,5 \text{ ppm}$

Tableau 3 : Efficacité de captage et débits d'air extraits sur les machines étudiées

Selon le type de polluant généré, les machines de l'atelier ont été connectées à trois circuits de ventilation. La technique de travail a permis de calculer les débits d'air extraits par chacun des circuits. Le tableau 4 indique les débits d'air mesurés sur chaque circuit.

Débits d'air (m ³ /s)	Circuits			
	Extraction 1	Extraction 2	Extraction 3	Introduction
Extrait Q _e	6	2,45	3,55	-
Introduit Q _s	-	-	-	11,8

Tableau 4 : Débits d'air mis en oeuvre dans l'atelier

2 - PERFORMANCES DE LA VENTILATION GENERALE

2.1 - Méthode d'évaluation

On est souvent amené à utiliser la notion de taux de renouvellement d'air d'un local lorsqu'on ne dispose pas de données suffisantes pour le calcul de la ventilation générale. Ce taux de renouvellement est défini comme le rapport du débit d'air total introduit ou extrait Q (m³/s) sur le volume du local V (m³).

$$n = \frac{Q}{V} \quad (1/s)$$

L'inverse du taux de renouvellement est appelé constante de temps du système τ_n .

Cette approche de la ventilation générale est loin d'être performante et ne permet pas d'évaluer sa qualité ni de la quantifier. Aussi, la recherche d'une meilleure connaissance des performances de la ventilation générale a fait l'objet de travaux d'ordre théorique ainsi que de validation des résultats tant en laboratoire que sur site.

SANDBERG, SJÖBERG [6], SKÅRET [7] ont essentiellement travaillé sur l'aspect théorique du problème. KALLIOKOSKI, NIEMELÄ [8], NIEMELÄ, TOPPILA [9] ont, quant à eux, étudié la ventilation générale de différents locaux de travail et ainsi montré les possibilités offertes par la technique de traçage pour en évaluer les performances.

La méthode proposée par ces différents auteurs introduit de nouvelles notions en distinguant :

- la façon dont se distribue l'air neuf de compensation dans le local (distribution d'air neuf) ;
- la capacité d'évacuation des polluants dispersés dans le local (efficacité de la ventilation).

2.1.1 - Distribution d'air

La détermination de la distribution d'air est réalisée à partir d'une génération de traceur dans les dispositifs d'introduction d'air neuf et des prélèvements dans les conduites d'extraction et en différents points du local. La concentration de traceur est mesurée en fonction du temps (C_e(t) concentration dans la gaine d'extraction, C_p(t) concentration au point p).

L'efficacité moyenne de la distribution d'air pour l'ensemble du local $\langle \eta \rangle$ est définie comme étant le rapport entre la constante de temps du système τ_n et le temps de résidence moyen de tout l'air dans le local τ_r , défini comme étant le double de l'âge moyen de l'air présent dans l'ensemble du local $\langle \tau_p \rangle$ [7] [10].

$$\langle \eta \rangle = \frac{\tau_n}{\tau_r} \times 100 \text{ (\%)}$$

En mesurant l'âge moyen de l'air en un point p du local τ_p et en le comparant à la constante du temps du système τ_n , on peut évaluer le potentiel de la distribution d'air dans la zone proche de ce point. L'efficacité ponctuelle de la distribution d'air η_p est définie comme suit :

$$\eta_p = \frac{\tau_n}{2 \tau_p} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

En plus de la détermination de τ_p , $\langle \tau_p \rangle$ et τ_r , il est possible, avec les mesures de concentration dans les gaines d'extraction, de calculer un âge d'extraction moyen de l'air τ_e qui est indépendant de l'écoulement de l'air dans le local. En l'absence d'entrées ou de sorties d'air parasites non maîtrisées $\tau_e = \tau_n$.

A partir de la concentration $C_e(\infty)$ mesurée en régime établi dans les conduites d'extraction, on définit un coefficient de transfert continu K_{ce} comme étant le rapport de cette concentration sur le débit de traceur généré \dot{q}_{He} .

Les formules permettant de calculer $\langle \tau_p \rangle$, τ_p , τ_e et K_{ce} sont données dans le tableau 5 en fonction du mode de génération du traceur.

2.1.2 - Efficacité de la ventilation sur l'évacuation des polluants

L'évaluation de cette efficacité est calculée à partir de la génération du traceur au niveau des machines implantées dans l'atelier et des prélèvements dans les conduites d'extraction et en différents points caractéristiques du local.

La concentration du traceur est mesurée en fonction du temps ($C_e^C(t)$ concentration dans la gaine d'extraction, $C_p^C(t)$ concentration au point p).

L'efficacité moyenne de la ventilation ou index de performance moyen de la ventilation définissant la capacité à évacuer les polluants générés $\langle e_p^C \rangle$ est défini comme étant le rapport entre la constante de temps du système τ_n et le temps de résidence moyen des polluants dans le local τ_e^C . Ce rapport est égal à la concentration moyenne dans la gaine d'extraction $C_e(\infty)$ sur la moyenne des concentrations aux différents points p de prélèvements dans le local $\langle C_p^C(\infty) \rangle$ lorsque le traceur est généré dans le local [10].

$$\langle \varepsilon_p^C \rangle = \frac{\tau_n}{\tau_e^C} \cdot 100 (\%) = \frac{\overline{C_e(\infty)}}{\langle C_p^C(\infty) \rangle} \cdot 100 (\%)$$

Comme pour l'évaluation des performances de la distribution, on peut définir un index de performance ponctuel de la ventilation définissant la capacité à évacuer les polluants générés à un poste de travail ε_p^C .

ε_p^C au point p est le rapport entre la concentration moyenne dans la gaine d'extraction $\overline{C_e(\infty)}$ sur la concentration mesurée au point p : $\overline{C_p^C(\infty)}$ lorsque le traceur est généré dans le local.

$$\varepsilon_p^C = \frac{\overline{C_e(\infty)}}{\overline{C_p^C(\infty)}} \cdot 100 (\%)$$

Le rapport de la concentration mesurée en un point p : $\overline{C_p^C(\infty)}$ sur le débit de traceur généré \dot{q}_{He} en un autre point définit le coefficient de transfert continu K_{cp} .

$$K_{cp} = 10^{-6} \frac{\overline{C_p^C(\infty)} - \overline{C_0}}{\dot{q}_{He}} \quad (m^3/h)^{-1}$$

Notons qu'il existe une relation étroite entre le coefficient de transfert K_{cp} et l'index de performance ε_p^C .

$$K_{cp} = \frac{1}{\varepsilon_p^C \cdot Q_e \cdot 3600} \quad (m^3/h)^{-1}$$

L'âge moyen du contaminant au point p τ_p^C permet de connaître l'évolution moyenne de la concentration du gaz traceur en un point en fonction du temps. La relation $(-\frac{1}{\tau_p^C})$ donne la pente λ_p^C de la droite de

décroissance $\text{Ln} \left(\frac{C_p^C(t) - \overline{C_0}}{C_p^C(0) - \overline{C_0}} \right)$ en fonction du temps.

Une analyse plus fine de l'évolution de la concentration est possible en étudiant la courbe de décroissance instantanée en fonction du temps. En général, cela fait apparaître une courbe composée de deux droites montrant ainsi l'existence autour du point p de zones sur ou sous-ventilées.

Les pentes de ces droites permettent de calculer plusieurs âges ponctuels du contaminant au point p :

$$\tau_p^C \text{ instantané} = - \frac{1}{\lambda_p^C \text{ instantané}} = \frac{\Delta t}{\Delta \ln \left(\frac{C_p^C(t) - \bar{C}_0}{C_p^C(o) - \bar{C}_0} \right)}$$

Les formules permettant de calculer τ_p^C , K_{cp} sont données dans le tableau 5.

Notons que dans certains cas (en particulier lorsqu'il est difficile de mesurer $C_e(\infty)$ dans les gaines d'extraction), il est plus aisé d'étudier les performances de la ventilation à partir des coefficients de transfert continu K_{cp} qu'en utilisant l'index ponctuel de performance.

Point d'injection	Conduite d'introduction		Dans le local
Localisation du point de mesure	Conduite d'extraction	Dans le local	Dans le local
Modes de génération	<p>Impulsion</p>  $\tau_e = \frac{\int_0^\infty t \cdot (C_e(t) - \bar{C}_0) dt}{\int_0^\infty (C_e(t) - \bar{C}_0) dt}$ $\langle \tau_p \rangle = \frac{1}{2\tau_n} \cdot \frac{\int_0^\infty t^2 (C_e(t) - \bar{C}_0) dt}{\int_0^\infty (C_e(t) - \bar{C}_0) dt}$		$\tau_p^C = \frac{\int_0^\infty t \cdot (C_p(t) - \bar{C}_0) dt}{\int_0^\infty (C_p(t) - \bar{C}_0) dt}$
	<p>Echelon croissant</p>  $K_{ce} = 10^{-6} \cdot \frac{C_e(\infty) - \bar{C}_0}{\delta_{He}}$	$\tau_p = \int_0^\infty \left(1 - \frac{(C_p(t) - \bar{C}_0)}{(C_p(\infty) - \bar{C}_0)} \right) dt$	$\tau_p^C = \int_0^\infty \left(1 - \frac{(C_p^C(t) - \bar{C}_0)}{(C_p^C(\infty) - \bar{C}_0)} \right) dt$ $K_{cp} = 10^{-6} \cdot \frac{C_p^C(\infty) - \bar{C}_0}{\delta_{He}}$
	<p>Echelon décroissant</p> 		$\tau_p = \int_0^\infty \left(\frac{C_p(t) - \bar{C}_0}{C_p(o) - \bar{C}_0} \right) dt$ $\tau_p^C = \int_0^\infty \left(\frac{C_p^C(t) - \bar{C}_0}{C_p^C(o) - \bar{C}_0} \right) dt$ $K_{cp} = 10^{-6} \cdot \frac{C_p^C(o) - \bar{C}_0}{\delta_{He}}$

* Lorsque les introductions et les extractions sont bien maîtrisées et connues, $\tau_e = \tau_n$. Aussi, pour le calcul de $\langle \tau_p \rangle$, nous avons pris τ_e à la place de τ_n .

** Les coefficients de transfert K_{cp} sont calculés pour l'ensemble de la ventilation de l'atelier (locale et générale). Si on ne souhaite étudier que la ventilation générale, il faudra prendre $K'_{cp} = \frac{K_{cp}}{(1 - \alpha)}$ où α est l'efficacité du dispositif de captage localisé.

Tableau 5 : Formules utilisées pour évaluer les performances de la ventilation

2.2 - Résultats de mesures

2.2.1. Distribution d'air

Le tableau 6 regroupe les résultats de mesures effectuées sur site et permettant d'évaluer l'efficacité de la distribution de l'air.

Localisation des points de mesures			
Conduite d'extraction		Dans le local au point 1	
$\overline{C_e(\infty)}$	35 ppm	τ_1	190 s
$\overline{C_o(\infty)}$	6,5 ppm	/	/
$\langle \tau_e \rangle$	213 s	/	/
τ_p	168 s	/	/
\dot{q}_{He}	1,2 m ³ /h	/	/

Tableau 6 : Résultats de mesures

On en déduit les efficacités moyennes et ponctuelles de la distribution de l'air pour l'ensemble du local ainsi que le coefficient de transfert continu pour l'ensemble du local :

$$\langle \eta \rangle = 63 \%$$

$$\eta_1 = 56 \%$$

$$K_{ce} = 23,7 \times 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{h)}^{-1}$$

On peut vérifier que le débit d'air extrait calculé à partir du coefficient de transfert K_{ce} est proche de celui calculé en appliquant la norme ISO 4053/1 - 1977 (voir § 1.1) :

$$Q_e = \frac{1}{K_{ce} \cdot 3600} = 11.70 \text{ m}^3/\text{s}.$$

2.2.2. Efficacité de la ventilation générale

Le traceur a été généré en plusieurs points à proximité des machines b, f, i, j, l et les prélèvements ont été effectués aux points 1 à 6 et à proximité des machines f et i à l.

Le tableau 7 donne, en fonction des points de génération et de prélèvements d'hélium, les concentrations en régime établi $\overline{C_p^C(\infty)}$, les âges moyens des contaminants aux différents points p : τ_p^C et les coefficients de transfert continu aux différents points p : K_{cp} .

Les décroissances de la concentration d'hélium $C_p^C(t)$ en fonction du temps ont été suivies en 4 points (3, f, j et k) et portées sur les graphes de la figure 4. Elles font apparaître en chaque point deux droites ayant des pentes différentes (λ_{p1}^C et λ_{p2}^C). Sur chaque graphe, ont été tracées les droites de pentes λ_e^C et λ_p^C obtenues à partir de l'âge d'extraction moyen de l'air ($\lambda_e^C = -\frac{1}{\tau_e}$) et de l'âge moyen du contaminant au point p ($\lambda_p^C = -\frac{1}{\tau_p^C}$).

Points d'injection	Localisation des points de mesures															
	1	2	3	4	5	6										
b	$\left\{ \begin{array}{l} \overline{C_p^C(\infty)}/\overline{C_0} \quad (\text{ppm}) \\ \tau_p^C \quad (\text{s}) \\ K_{cp} \cdot 10^{-6} \quad (\text{m}^3/\text{h})^{-1} \end{array} \right.$		19,3/6,8	407*	13,2	12,3	11,9	8,7	11,4	11,6						
f	$\left\{ \begin{array}{l} \overline{C_p^C(\infty)}/\overline{C_0} \quad (\text{ppm}) \\ \tau_p^C \quad (\text{s}) \\ K_{cp} \cdot 10^{-6} \quad (\text{m}^3/\text{h})^{-1} \end{array} \right.$					16,4/5,5	268	7	7,5	33,1	5,5	12,1	35,3			
i	$\left\{ \begin{array}{l} \overline{C_p^C(\infty)}/\overline{C_0} \quad (\text{ppm}) \\ \tau_p^C \quad (\text{s}) \\ K_{cp} \cdot 10^{-6} \quad (\text{m}^3/\text{h})^{-1} \end{array} \right.$						13,3/5,9	223	6,8	5,3	5,3	6,2	6,5	5,8		
j	$\left\{ \begin{array}{l} \overline{C_p^C(\infty)}/\overline{C_0} \quad (\text{ppm}) \\ \tau_p^C \quad (\text{s}) \\ K_{cp} \cdot 10^{-6} \quad (\text{m}^3/\text{h})^{-1} \end{array} \right.$		11,7/5,5						5,8	6,3	5,1	5,6	5	11,5/5,5	262	5
l	$\left\{ \begin{array}{l} \overline{C_p^C(\infty)}/\overline{C_0} \quad (\text{ppm}) \\ \tau_p^C \quad (\text{s}) \\ K_{cp} \cdot 10^{-6} \quad (\text{m}^3/\text{h})^{-1} \end{array} \right.$		NM	5,7	NM	NM							5,6			6

*Couple point d'émission, point de prélèvement ayant fait l'objet d'une étude de la décroissance des concentrations en fonction du temps.

Tableau 7 : Résultats de mesures

Points d'injection \ Localisation des points de mesures	f	i	j	k	l
b $\left\{ \begin{array}{l} \overline{C_p^C(\infty)}/\overline{C_0} \quad (\text{ppm}) \\ \tau_p^C \quad (\text{s}) \\ K_{cp} \cdot 10^{-6} \quad (\text{m}^3/\text{h})^{-1} \end{array} \right.$	16,7/6,8 393*				
i $\left\{ \begin{array}{l} \overline{C_p^C(\infty)}/\overline{C_0} \quad (\text{ppm}) \\ \tau_p^C \quad (\text{s}) \\ K_{cp} \cdot 10^{-6} \quad (\text{m}^3/\text{h})^{-1} \end{array} \right.$					11,4/5,9 255
j $\left\{ \begin{array}{l} \overline{C_p^C(\infty)}/\overline{C_0} \quad (\text{ppm}) \\ \tau_p^C \quad (\text{s}) \\ K_{cp} \cdot 10^{-6} \quad (\text{m}^3/\text{h})^{-1} \end{array} \right.$		225		11,3/5,5 237*	
l $\left\{ \begin{array}{l} \overline{C_p^C(\infty)}/\overline{C_0} \quad (\text{ppm}) \\ \tau_p^C \quad (\text{s}) \\ K_{cp} \cdot 10^{-6} \quad (\text{m}^3/\text{h})^{-1} \end{array} \right.$			11,6/6 97* 6		

*Couple point d'émission, point de prélèvement ayant fait l'objet d'une étude de la décroissance des concentrations en fonction du temps.

Tableau 7 (suite) : Résultats de mesures

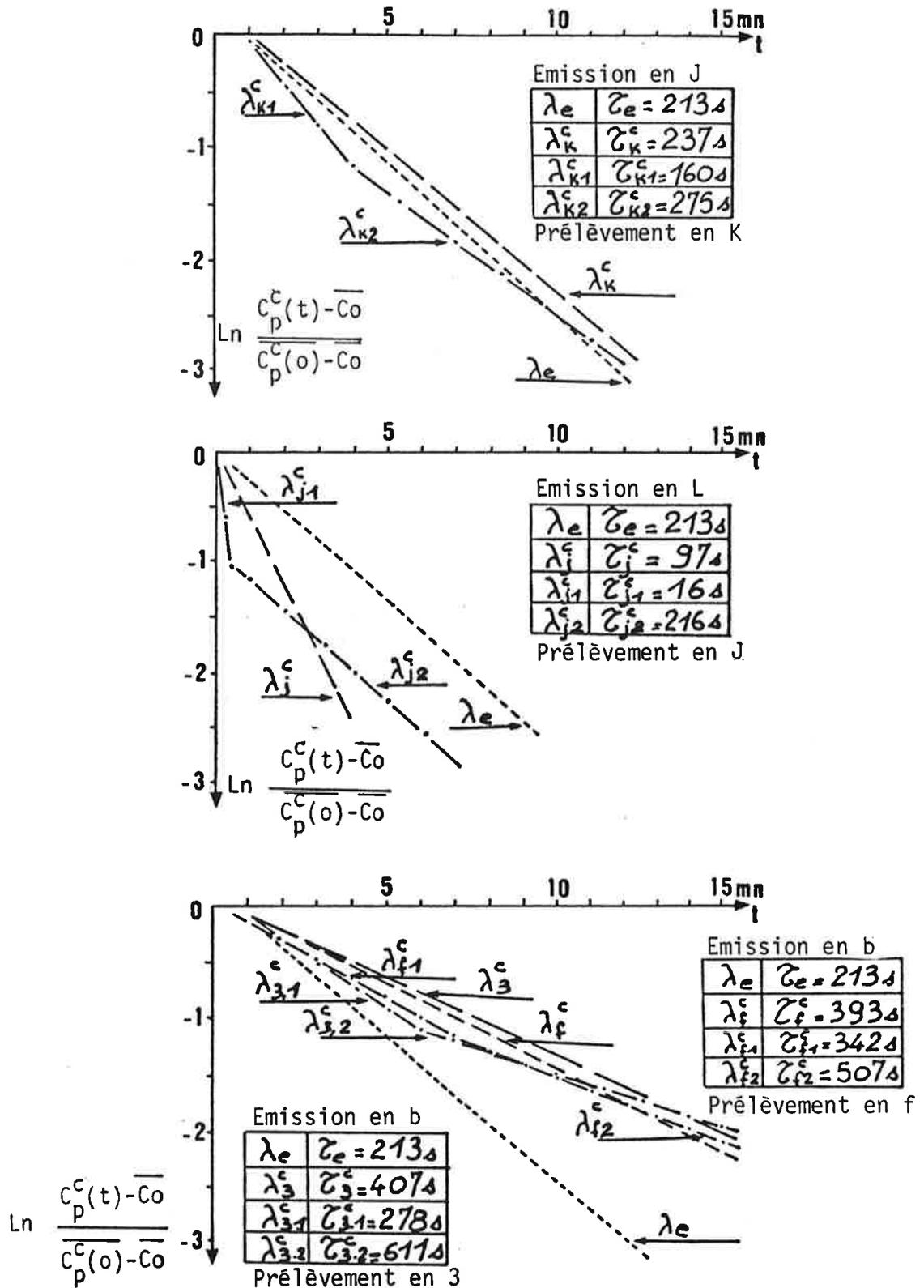


Figure 4 : Décroissance de Ln C en fonction du temps pour différents points d'injection et de prélèvement dans le local

3 - DEBIT SOURCE

3.1 - Méthode d'évaluation

VAVASSEUR, MULLER [1], BURGHOFFER, CHARUAU [11] ont comparé le comportement d'un polluant particulaire et d'un gaz traceur dans les écoulements d'air. Il ressort de ces travaux :

- que leurs coefficients de transfert dans un local sont pratiquement identiques lorsque le diamètre aérodynamique des particules est inférieur à $3 \mu\text{m}$;
- que les erreurs commises sur les coefficients de transfert dans le local sont faibles lorsque le diamètre aérodynamique des particules reste inférieur à $10 \mu\text{m}$.

Dans ces conditions, il est possible d'écrire que les coefficients de transfert K_{cp} (§ 2.1.2), calculés à partir du polluant réel et du gaz traceur, sont identiques :

$$K_{cp} = 10^{-3} \left(\frac{\overline{C_3} - \overline{C_0}}{\dot{q}} \right)_{\text{poussière}} = 10^{-6} \left(\frac{\overline{C_3} - \overline{C_0}}{\dot{q}} \right)_{\text{hélium}}$$

avec $\dot{q}_{\text{poussière}}$ = débit de poussière (g/h)

$\overline{C_3}$ = concentration moyenne en régime établi du polluant au point de mesure $\overline{C_{3\text{He}}}$ - traceur (ppm)
 $\overline{C_{3\text{poussière}}}$ - poussière (mg/m³)

$\overline{C_0}$ = concentration moyenne du bruit de fond au point de mesure $\overline{C_{0\text{He}}}$ - traceur (ppm)
 $\overline{C_{0\text{poussière}}}$ - poussière (mg/m³)

On en déduit le débit source du polluant réel en appliquant la formule:

$$\dot{q}_{\text{poussière}} = 10^3 \cdot \dot{q}_{\text{He}} \frac{(\overline{C_3} - \overline{C_0})_{\text{poussière}}}{(\overline{C_3} - \overline{C_0})_{\text{hélium}}} \quad (\text{g/h})$$

L'étude de faisabilité a porté sur une seule machine ne générant que de fines poussières (ponceuse à bande étroite). La figure 5 représente le poste de travail avec les emplacements du système de génération du gaz traceur et les appareils de prélèvements (poussières, gaz) nécessaires à l'évaluation du débit source.

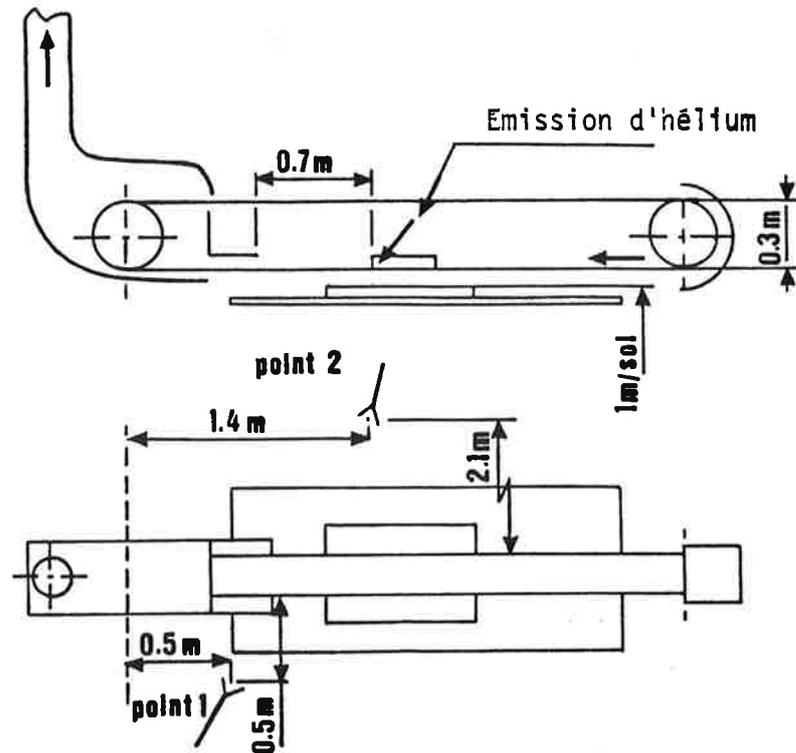


Figure 5 : Poste de travail avec implantation des points de génération et de prélèvement

3.2 - Résultats de mesures

Le débit source en polluant réel a été calculé à partir de différents débits d'aspiration.

Le tableau 8 fait apparaître les débits sources calculés en fonction du débit d'air aspiré et des appareils de prélèvement.

Débit d'air extrait (m ³ /s)	Concentration						Débit de pouss. générée dont la granulométrie est < 10 µm (g/h)	
	Poussière (mg/m ³)				Helium (ppm)			
	Total	Point 1 < 10 µm	Total	Point 2 < 10 µm	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2
0,65	1,44 ± 0,26	0,55 ± 0,09	1,24 ± 0,24	0,32 ± 0,06	3,7 ± 0,5	2,4 ± 0,5	45 ± 25	40 ± 33
0,35	1,36 ± 0,37	0,72 ± 0,16	2,4 ± 0,37	0,56 ± 0,08	4,3 ± 0,5	3,5 ± 0,5	50 ± 30	48 ± 26
0,35	1,25 ± 0,3	0,6 ± 0,15	3,22 ± 0,5	0,77 ± 0,12	4 ± 0,5	NM	45 ± 30	-
0,2	6,55 ± 0,87	3 ± 0,4	16,1 ± 1,8	4,02 ± 0,45	18 ± 0,5	23,2 ± 0,5	50 ± 10	52 ± 8
0,2	7,41 ± 1,01	3,42 ± 0,46	30,96 ± 3,4	7,75 ± 0,85	19 ± 0,5	37,5 ± 0,5	54 ± 11	62 ± 8

Les concentrations indiquées dans ce tableau sont les concentrations mesurées C_3 moins le bruit de fond C_0 .

Débit d'hélium $\dot{q}_{He} = 0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ lors de la campagne d'essais.

Tableau 8 : Débits sources pour une ponceuse à bande étroite

DISCUSSIONS

1 - MESURES DES DEBITS D'AIR EXTRAITS ET DES EFFICACITES DE CAPTAGE DES DISPOSITIFS D'ASPIRATION

L'application de la technique de traçage pour mesurer les débits d'air extraits (Q_e) et les efficacités de captage (α) est assez simple si certaines conditions de mise en oeuvre sont respectées (longueurs dites de "bon mélange", constante de temps du local...).

Cette méthode présente l'avantage d'être rapide, reproductible dans le temps et autorise la comparaison de différentes solutions pouvant améliorer le captage (modification des capteurs, augmentation des débits d'air) tout en étant certain de l'absence d'interférences provenant d'autres postes de travail. Ainsi, l'efficacité de captage de la machine c a pu être portée de 90,3 à 100 % en faisant passer le débit d'air extrait de 0,25 à 0,51 m³/s.

2 - PERFORMANCES DE LA VENTILATION GENERALE

Lors de l'analyse de la ventilation générale, il est important de faire la distinction entre :

- la façon dont se distribue l'air neuf de compensation dans le local (distribution d'air neuf) ;
- la capacité de la ventilation à évacuer les polluants dispersés dans le local (efficacité de la ventilation).

2.1 - La façon dont se distribue l'air neuf est caractérisée par :

- l'efficacité moyenne de la distribution d'air $\langle \eta \rangle$,
- l'efficacité ponctuelle de la distribution d'air η_p .

Elles valent 100 % lorsque l'écoulement est unidirectionnel en piston et 50 % lorsque le mélange d'air est complet.

Dans l'atelier étudié, $\langle \eta \rangle = 63 \%$ et η_p au point 1 vaut $\eta_1 = 56 \%$.

On peut en conclure que l'écoulement procède par déplacement d'air intermédiaire entre l'écoulement piston et le mixage parfait, ce qui paraît conforme à la réalité puisque l'introduction de l'air de compensation est faite sous le toit de façon uniforme et les extractions d'air se font près du sol en des points disséminés dans tout le local.

On peut noter qu'au point 1, le brassage de l'air est proche du brassage complet.

2.2 - Capacité de la ventilation générale à évacuer les polluants

Le coefficient de transfert continu K_{cp} et/ou l'indice de performance ponctuel de la ventilation ϵ_p^C permettent d'étudier la contribution d'une source à la pollution d'un point situé en un autre endroit du local.

Le tableau 9 donne, pour chaque point de génération, le rapport de l'indice de transfert K_{cp} au point p sur l'indice de transfert au point 2. Lorsque le rapport est supérieur à 1, la source contribue plus à la pollution en ce point p qu'au point 2. Si le rapport est inférieur à 1, la source contribue moins à la pollution de ce point p qu'au point 2.

Points d'émission	Points de prélèvement					
	1 k_1/k_2	2 k_2/k_2	3 k_3/k_2	4 k_4/k_2	5 k_5/k_2	6 k_6/k_2
Machine b	1,07	1	0,97	0,71	0,93	0,94
Machine f	0,93	1	4,41	0,73	1,61	4,71
Machine i	1,28	1	1	1,17	1,23	1,09
Machine j	0,92	1	0,81	0,89	0,79	0,79
Machine l	NM	1	NM	NM	0,98	1,05

Tableau 9 : Rapport du coefficient de transfert continu au point p sur le coefficient de transfert continu au point 2 en fonction du point d'émission du gaz traceur

La comparaison entre l'âge moyen du polluant en un point τ_p^C et l'âge d'extraction moyen de l'air τ_e apporte des éléments de réponse sur la capacité de la ventilation à évacuer les polluants présents en ce point. Le ratio AEPI, égal à τ_e/τ_p^C , peut être considéré comme un indicateur de performance d'échange moyen de la ventilation.

Des valeurs supérieures à 1 indiquent un type d'écoulement par déplacement et des valeurs inférieures à 1 indiquent un type d'écoulement court-circuit.

La figure 4 met en évidence, en chaque point, deux régimes de décroissance pour chacun desquels il est possible de calculer un âge moyen du contaminant τ_{p1}^C , τ_{p2}^C . Ce phénomène met en évidence la présence dans le local de zones sur-ventilées et de zones sous-ventilées. La contamination présente dans les zones mal ventilées s'élimine plus lentement vers les zones sur-ventilées. Elle augmente les âges moyens de contaminant lorsque les polluants situés dans les zones sur-ventilées ont été évacués.

Le tableau 10 donne, pour 4 points de prélèvement, les valeurs prises pour τ_p^C , τ_{p1}^C , τ_{p2}^C et AEPI.

Points de prélèvement	$\tau_e = \frac{1}{n}$ (s)	$\tau_p^C = -\frac{1}{\lambda_p}$ (s)	$\tau_{p1}^C = -\frac{1}{\lambda_{p1}}$ (s)	$\tau_{p2}^C = -\frac{1}{\lambda_{p2}}$ (s)	AEPI = $\frac{\tau_e}{\tau_p^C}$
Point 3	213	407	278	611	0,52
Machine f	213	393	342	507	0,54
Machine j	213	97	16	216	2,2
Machine k	213	237	160	275	0,9

Tableau 10 : Age d'extraction moyen de l'air, âge moyen du contaminant et AEPI pour 4 points de prélèvement

3 - DEBIT SOURCE

Les résultats obtenus, sur site, montrent que la quantification des débits source en poussières fines est possible en couplant des prélèvements d'atmosphère et des mesures de concentration de gaz traceur en un même point.

Pour la ponceuse à bande étroite, le débit de poussières inférieur à 10 μm est d'environ 50 g/h. A noter que la précision sur le résultat (de $\pm 20\%$ à $\pm 60\%$) est très nettement améliorable en augmentant les temps de prélèvement et ainsi disposer d'une quantité de poussières plus importante sur les filtres.

CONCLUSION

La technique de mesure par gaz traceur est un outil puissant pour évaluer globalement la ventilation et l'assainissement d'un local de travail.

Avec un même appareillage de mesures, il est possible de :

- mesurer les débits d'air dans les conduites fermées ;
- quantifier l'efficacité de captage des dispositifs d'aspiration et de les optimiser rapidement en pouvant comparer différentes solutions (forme de capots, débits d'air extraits, ...)
- évaluer les performances de la ventilation générale.

En connaissant les débits sources générés par les processus de fabrication, il est possible de prévoir la contribution de ceux-ci à la pollution réelle des postes de travail.

L'hygiéniste industriel pourra donc, à partir de ces différentes données, fixer un ordre de priorité dans ses actions destinées à améliorer l'assainissement des postes de travail.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Monsieur AUBERTIN pour l'aide et les suggestions qu'il leur a apportées dans la conduite de cette étude.

- [1] C. VAVASSEUR, J.P. MULLER, G. AUBERTIN
Application of Tracer Gas methods to the measurements of Ventilation -
Parameters in Nuclear plants and Various Industrial Sectors
"Ventilation 85" (Ed. HD GOODFELLOW)
Elsevier Science - Publishers, AMSTERDAM (1986) - pp 785-796
- [2] J.P. FARANT, D. MAC KINNON, N. ROWLANDS
Mise au point de méthodes utilisant un gaz traceur pour déterminer le
rendement de systèmes de ventilation dans divers milieux de travail
Travail et Santé - 1985
- [3] M. FLYNN, M.J. ELLENBECKER
Capture Efficiency of Local Exhaust Hoods
Submitted to Annals of Occupational Hygiene - 1986
- [4] V. HAMPL, R. NIEMELÄ, S. SHULMAN, D. BARTLEY
Use of Tracer Gaz Technique for Industrial Exhaust Hood efficiency -
Evaluation Where to sample ?
American Industrial Hygiene Association Journal - 45 (1986) -
pp 281-287
- [5] M. ELLENBECKER, D. ROBERT, F. GEMPEL, W. BURGESS
Capture Efficiency of local Exhaust Ventilation Systems
American Industrial Hygiene Association Journal - 44 (1983) -
pp 752-755
- [6] M. SANDBERG, M. SJÖBERG
The use of moments for assessing air quality in Ventilated Rooms -
Building and Environment - Vol. 18 n° 4 (1983) - pp 181.197
- [7] E. SKÅRET
A survey of concepts of ventilation effectiveness
The Norwegian Institute of technology STF 15 A84057 - Division of
Heating and ventilating - TRONDHEIM
- [8] P. KALLIOKOSKI, R. NIEMELÄ, J. SALMIRAAVA
The tracer gas technique - A useful tool for industrial hygiene -
Scand j work environ health 6 (1980) - pp 123-130
- [9] R. NIEMELÄ, E. TOPPILA, I. ROLIN
Characterization of supply air distribution in large industrial pre-
mises by the tracer gas technique "Ventilation 85" (Ed. by
H.D. GODFELLOW)
Elsevier Science-Publishers, AMSTERDAM (1986) pp 797-805
- [10] R. NIEMELÄ
Characterization of the performance of industrial ventilation systems
by the tracer gas technique
Institute of Occupational Health Helsinki - Département of Physics
(1986)
- [11] P. BURGHOFFER, J. CHARUAU
Etude du transfert des gaz et des aérosols
Institut de protection et de sécurité nucléaire - Département
Protection
Rapport interne C.E.A. (Mars 1985) non publié