

→ *P. Poirot, M. Grzebyk,
M. Héry, C. Possoz, I. Subra,
Département Ingénierie des procé-
dés, Centre de recherche de
l'INRS-Lorraine, Nancy*

Efficacité de masques anti-gaz à ventilation libre en situation industrielle

→ P. Poirot, M. Grzebyk,
M. Héry, C. Possoz, I. Subra,
Département Ingénierie des procédés,
Centre de recherche de
l'INRS-Lorraine, Nancy

Efficacité de masques anti-gaz à ventilation libre en situation industrielle

EFFICIENCY OF NEGATIVE PRESSURE GAS RESPIRATORS IN FACTORY CONDITIONS

Thirty operatives working in six companies volunteered to take part in a survey to measure the performance of seven negative pressure gas respirators with no powered ventilation. Two full-face masks and five half-masks were tested. Each mask was fitted with a filter adapted to the solvent to which operatives were exposed. A new filter was used for each test. The efficiency of the masks was gauged by taking simultaneous readings of pollutant gas levels inside the masks (actual exposure) and outside the masks (potential exposure). The pollutant gases were generated by solvent mixtures. The study produced the following findings:

- only one mask was shown to be inefficient. There was little or no difference in the performances of the other six,
- mask leakage in actual working conditions is about 10%, which matches the results of earlier tests conducted by the INRS. Leakage is higher than levels usually indicated in the literature (between 2% and 4%),
- the variability of results excludes prediction of the efficiency of negative pressure gas respirators in industrial settings.

- respiratory protective device
- negative pressure mask
- solvents ● efficiency
- measurement

Trente ouvriers, employés dans six entreprises, ont participé sur la base du volontariat à une étude visant à mesurer l'efficacité de sept masques anti-gaz à ventilation libre (sans ventilation assistée), dont deux masques complets et cinq demi-masques. Tous les masques ont été utilisés avec des filtres appropriés aux solvants, auxquels les travailleurs étaient exposés, et renouvelés à chaque essai. L'efficacité des masques a été mesurée à partir des concentrations de polluants, déterminées simultanément à l'intérieur du masque (exposition « réelle » de l'opérateur) et à l'extérieur (exposition « potentielle » de l'opérateur). Les polluants gazeux étaient constitués par des mélanges de solvants. L'étude a mis en évidence les éléments suivants :

- à l'exception d'un demi-masque aux performances médiocres, il n'y a pas ou peu de différences significatives entre les six autres appareils testés ;
- dans les conditions d'utilisation réelles, les fuites des appareils testés sont d'environ 10 %. Cette valeur correspond aux résultats d'études précédentes menées à l'INRS concernant les demi-masques anti-poussières. Pour les masques complets, cette valeur est plus élevée que celles généralement indiquées dans la littérature (2 à 4 %) ;
- la variabilité des résultats ne permet pas la prévision de l'efficacité d'un masque anti-gaz en milieu industriel.

● appareil de protection respiratoire ● masque ● solvant ● efficacité ● mesure

Le recours aux appareils de protection respiratoire dans l'industrie est assez répandu. Il existe toute une gamme d'appareils sur le marché correspondant à la plupart des situations rencontrées : de la simple pièce faciale filtrante jetable à l'appareil isolant autonome avec dispositif d'apport d'air ou d'oxygène, en passant par les appareils à ventilation assistée ou pression positive et les appareils à ventilation libre.

Chaque type d'appareil a été conçu pour s'adapter à des situations spécifiques. Un appareil de protection respiratoire en milieu de travail ne devrait être utilisé que dans certaines situations à caractère exceptionnel et pour une courte durée. Or, l'utilisation habituelle de masque à cartouche anti-gaz à ventilation libre est parfois nécessaire pour protéger les salariés, en raison de l'absence ou de l'insuffisance de la protection collective prévue par la réglementation.

Il est très difficile de prévoir l'efficacité réelle d'un masque en situation industrielle. Des études ont montré qu'il existait de fortes différences entre les efficacités mesurées en laboratoire dans le cadre d'essais normatifs et celles mesurées en situation industrielle, pour différents types de masques anti-poussières [1, 2]. Ces études ont aussi montré que les performances de ces appareils tendent à s'égaliser sur le terrain avec une efficacité bien inférieure à celle qu'on aurait pu attendre, suite aux résultats de laboratoire. Pour ce qui concerne les masques anti-gaz, les cartouches font l'objet d'essais normatifs au laboratoire [3, 4]. Les masques eux-mêmes doivent répondre aux spécifications de la norme [5, 6]. Les études consacrées aux mesures d'efficacité en milieu industriel, bien que moins nombreuses que celles relatives aux masques anti-poussières, se développent surtout dans l'industrie du polyester, un secteur où l'utilisation du masque anti-gaz protège les ouvriers de l'exposition au styrène [7, 9].

Si l'élément filtrant est approprié aux vapeurs à piéger et dans la mesure où les concentrations et/ou le temps de saturation ne sont pas atteints, le paramètre déterminant d'un masque anti-gaz est la fuite au visage et c'est au cours de l'utilisation sur le terrain qu'apparaissent les problèmes d'étanchéité au visage.

L'objectif de cette étude est de mesurer la fuite au visage liée au manque d'étanchéité et, en particulier, d'évaluer les différences qui peuvent exister entre les masques complets et les demi-masques. Pour que cette comparaison soit pertinente, il convient de s'affranchir de paramètres fondamentaux, tels que le claquage des cartouches ou le positionnement de la sonde de prélèvement.

1. Efficacité d'un masque anti-gaz

1.1. Principe

Le principe de la mesure de l'efficacité des masques anti-gaz est schématisé *figure 1*. Il consiste à mesurer simultanément les concentrations en polluants gazeux à l'extérieur et à l'intérieur du masque.

Les masques ont été légèrement modifiés, de façon à recevoir une sonde de prélèvement placée au même endroit pour chacun d'entre eux, à gauche et à mi-distance des voies respiratoires nasales et buccales. Au cours de chaque essai, deux prélèvements simultanés ont été effectués, l'un à l'intérieur du masque, l'autre à l'extérieur, afin de déterminer les expositions « réelle » (1) et potentielle (intérieure/extérieure) du masque et d'en déduire la fuite. Le rapport inverse (extérieur/intérieur), largement utilisé, donne le facteur de protection du masque en situation de travail, ou WPF (Workplace Protection Factor). Dans cet article, les résultats expriment les fuites en pourcentage des appareils testés, le pourcentage complémentaire à 100 % d'une fuite désignant l'efficacité d'un masque.

(1) Une exposition réelle correspondrait à la concentration réelle à l'intérieur d'un masque due uniquement à sa fuite. On verra plus loin qu'on ne peut connaître réellement cette valeur, en raison notamment de la rétention pulmonaire des gaz par le sujet qui porte le masque. Dans le contexte évoqué ci-dessus, on utilise l'expression « exposition réelle » par opposition à l'exposition potentielle, qui serait celle à laquelle serait soumis le sujet s'il ne portait pas de masque.

1.2. Méthode de prélèvement et matériel utilisé

La méthode et le matériel de prélèvement décrits ci-dessous sont applicables aux solvants organiques présents sous forme de vapeur dans les atmosphères de travail.

Le support de prélèvement destiné à évaluer la concentration des polluants à l'intérieur du masque a été fixé au plus près d'une sonde de prélèvement qui traverse le masque pour éviter au maximum l'adsorption des gaz sur le tuyau souple intermédiaire. L'étanchéité des différentes liaisons sonde/tuyau, tuyau/tubes de prélèvement et pompes/tubes a été vérifiée au laboratoire. De même, l'ensemble du système de prélèvement ne devait pas accroître la fuite en raison de son poids.

Les prélèvements à l'intérieur et à l'extérieur des masques ont été réalisés sur des tubes SKC 226-01® à 2 plages de charbon actif (100 et 50 mg) pendant une durée moyenne de 1 heure. Les pompes de prélèvements Gillian LFS 113®, à régulation électronique, assuraient un débit de 200 ml par minute. Le principe du prélèvement direct à l'intérieur du masque a pour inconvénient majeur de piéger la vapeur d'eau présente résultant de l'expiration du sujet. Pour éviter la saturation du tube de piégeage en raison de l'humidité, tous les prélèvements à l'intérieur des masques ont été réalisés avec deux tubes en série.

Pour tenir compte de la perte de charge occasionnée par ce montage, une calibration des pompes de prélèvement a été nécessaire.

Biais résultant des techniques de prélèvements

En raison de la technique employée, la seule utilisable lors des campagnes de mesures en site industriel, le prélèvement intérieur est effectué au cours des phases inspiratoire et expiratoire. Mais au cours de la phase expiratoire, la concentration en polluants est plus faible que pendant la phase inspiratoire, en raison de l'absorption pulmonaire des polluants par le sujet. Ce phénomène déjà évoqué lors des travaux sur les masques anti-poussières [2] se complique lorsqu'il s'agit de polluants gazeux. La quantité de toxiques absorbée est fonction de la nature et de la concentration des polluants présents mais aussi d'une multitude d'autres facteurs, comme la solubilité des gaz dans le sang et les tissus, le débit sanguin, la ventilation pulmonaire. Après l'absorption pulmonaire, une fraction des polluants est métabolisée puis éliminée par la voie urinaire et/ou la voie pulmonaire. Une autre fraction du toxique est éliminée sous forme inchangée dans l'air expiré [10].

La détermination de l'efficacité réelle d'un masque anti-gaz à ventilation libre

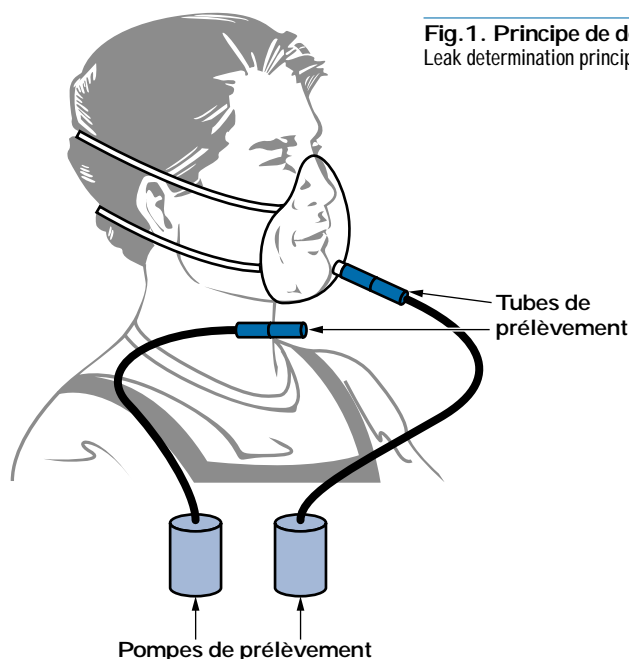


Fig. 1. Principe de détermination de la fuite - Leak determination principle

est donc liée au phénomène de rétention pulmonaire qui biaise les résultats [11, 12]. Les diverses études menées sur le sujet aboutissent à des conclusions différentes. Ainsi, certains chercheurs ont estimé pour le styrène (bien étudié dans l'industrie du polyester où l'usage du masque est fréquent) que la concentration mesurée à l'intérieur d'un masque pouvait être inférieure de 30 % à la concentration réelle due à la fuite, si le sujet n'avait pas été exposé au préalable [13]. D'autres chercheurs ont mis en évidence qu'une exposition antérieure au styrène, avant de porter un masque, pouvait entraîner une sur-estimation de la concentration intérieure [14, 16].

Toutefois ces deux cas de figures extrêmes correspondent à des situations très particulières qui n'ont pas été observées dans les entreprises visitées. Il en résulte que dans cette étude où la technique utilisée n'offrait pas d'autre solution que de prélever pendant les deux phases de la respiration, et devant l'impossibilité de mesurer les biais induits par la méthode, les concentrations mesurées à l'intérieur des masques ne sont pas corrigées de la rétention pulmonaire.

Une éventuelle pénétration percutanée n'a pas été envisagée dans cette étude.

1.3. Méthode d'analyse et matériel utilisé

Après désorption par 1 ml de sulfure de carbone, les tubes de prélèvements ont été analysés par chromatographie en phase gazeuse (CPG) en mode d'étalonnage externe avec colonne semi-capillaire et détecteur à ionisation de flamme :

- chromatographe Hewlet-Packard 5890[®] équipé d'un passeur automatique ;
- colonne Supelco SPB-1[®] ; L = 60 m, diamètre interne = 0,75 mm.

1.4. Polluants dosés

Au cours de cette étude, tous les polluants gazeux rencontrés et justifiant le port d'un appareil respiratoire dans les différents ateliers visités, étaient des solvants organiques facilement quantifiables par CPG. Il convenait de s'assurer que les polluants dosés avaient une limite de détection relativement basse pour assurer la meilleure précision possible sur la mesure de la concentration à l'intérieur du masque.

Cependant, tous les polluants gazeux détectés dans l'atmosphère des ateliers de travail n'ont pas été systématiquement dosés en raison des limitations dues aux tubes de piégeage. Ainsi les alcools, dont les coefficients d'adsorption/désorption ne sont pas satisfaisants, ont été écartés des dosages ainsi certaines cétones dont le piégeage est médiocre en milieu humide (cas des tubes « intérieurs »).

1.5. Méthode de calcul des fuites

Dans 3 entreprises, les analyses des tubes de prélèvement n'ont révélé qu'un seul polluant majeur ou qu'un seul type de polluant pouvant convenir pour déterminer la fuite qui est donc déterminée comme suit :

$$\text{Fuite [\%]} = (C_{\text{int}} / C_{\text{ext}}) \times 100$$

Dans 3 autres entreprises, il existait un mélange de polluants gazeux, dont chaque constituant était susceptible de convenir pour la détermination de la fuite. Dans ces cas, il est avéré que selon les produits dosés, des différences non négligeables peuvent exister entre les rapports respectifs de leur concentration intérieure sur leur concentration extérieure.

Cette différence est très vraisemblablement due aux biais signalés précédemment : absorption ou libération pulmonaire. En outre, les concentrations des différents polluants sont très variables dans l'atmosphère des ateliers de travail : il existe par exemple un rapport de 30 entre les concentrations en acétate de *n*-butyle et celles en ortho-xylène échantillonnées dans l'usine B. Les incertitudes analytiques qui en découlent sont d'autant plus importantes que les concentrations en polluants sont faibles (a fortiori à l'intérieur du masque).

Par conséquent, pour pallier cet inconvénient, lorsqu'il existe un mélange de solvants organiques, la fuite des masques est déterminée en faisant le rapport de la somme des concentrations mesurées à l'intérieur sur la somme des concentrations mesurées à l'extérieur des masques soit :

$$\text{Fuite [\%]} = \frac{\sum (C_{\text{int}})}{\sum (C_{\text{ext}})} \times 100$$

Ce type de calcul est équivalent à celui qui consisterait à faire intervenir, de façon proportionnelle les concentrations extérieures de chaque composant dosé pour déterminer la fuite du masque. Ainsi, dans l'exemple de l'usine B cité ci-dessus, l'acétate de *n*-butyle, dont la concentration

extérieure est 30 fois plus élevée que celle de l'ortho-xylène, influera d'autant sur le calcul pour déterminer la fuite au cours de cet essai.

Remarque

Les fuites calculées dans les mêmes conditions, à partir des concentrations en ppm (parties par million), peuvent être légèrement différentes en raison des différences de masses molaires et de densités.

Dans les entreprises qui ont collaboré à cette étude, les appareils de protection respiratoire habituellement utilisés par les salariés étaient uniquement des demi-masques. Le choix de ces appareils s'est donc imposé pour les tests d'efficacité. En complément, un autre demi-masque ainsi que deux masques complets - ceci dans un but de comparaison d'efficacité - ont été choisis au préalable. Ce sont au total 7 appareils de protection respiratoire, dont 2 masques complets et 5 demi-masques, tous munis de soupapes expiratoires, qui ont été testés.

Tous ces appareils utilisés sont conformes aux normes européennes EN 136 et EN 140 [5, 6]. Les masques neufs mis à la disposition des ouvriers étaient de taille standard. Ils étaient en outre soigneusement nettoyés et désinfectés entre chaque utilisation.

Les filtres anti-gaz des masques ont été changés à chaque test pour s'affranchir d'éventuels problèmes de saturation. À titre indicatif, le temps minimum avant saturation requis par la norme EN 141, vis-à-vis du gaz d'essai retenu pour chaque type de filtre à un débit de passage de 30 l/min, à 20 °C et à 70 % d'humidité relative, est de :

- 80 min à une concentration de 1 000 ppm en cyclohexane pour les filtres de classe A1,
- 40 min à une concentration de 5 000 ppm du même gaz pour les filtres de classe A2 [17].

Remarque

Concernant l'adsorption des polluants sur les matériaux des masques, il a été constaté au cours d'essais préliminaires avec des peintres en bâtiment, que du white-spirit avait été légèrement adsorbé par les matériaux souples en polymère (caoutchouc) de deux masques à la suite de leur nettoyage complet avec ce solvant. Pour éviter ces éventuels biais, par la suite tous les essais décrits dans cette étude ont été réalisés avec des appareils préalablement nettoyés à l'éthanol (servant également à la désinfection) et convenablement séchés dans une étuve portable à environ 60 °C. Grâce à ces dispositions, aucun polluant autre que ceux présents dans l'atmosphère n'a été détecté à l'intérieur des appareils de protection respiratoire.

Les principales caractéristiques des masques étudiés sont regroupées dans le [tableau I](#).

2. Campagne de mesures

2.1. Choix des entreprises et des salariés

Plusieurs entreprises ont été sélectionnées avec le concours des services Prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles des Caisses régionales d'assurance maladie. Ces entreprises ont été visitées préalablement aux campagnes de mesures car elles devaient satisfaire au mieux aux exigences définies pour le bon déroulement de l'étude.

On peut citer en particulier :

- un nombre minimum de salariés (3 ou 4) par entreprise habitués au port régulier du masque anti-gaz ;
- la compatibilité entre la réalisation de l'expérimentation et le travail des salariés (les appareils de prélèvements ne devaient pas influencer le travail des ouvriers ou n'induire qu'une gêne minimale) ;
- le port de la protection respiratoire pendant une durée d'au moins 45 min ;
- des polluants organiques facilement dosables.

Quelques prélèvements d'une durée légèrement inférieure, en raison de périodes de travail avec masque plus courtes que prévues, ont cependant été réalisés et pris en compte. Les entreprises où des ouvriers utilisent un masque pendant une durée inférieure à 15 min, lors de nettoyage par exemple, ont été volontairement écartées en raison de la nécessité d'un échantillonnage suffisamment long pour assurer une sensibilité analytique suffisante.

Les visites préliminaires dans les entreprises ont permis de rencontrer les salariés volontaires qui allaient porter les masques sélectionnés pour l'étude. Une courte formation leur a été dispensée,

quand cela semblait nécessaire, pour assurer le port correct des masques (réglages, positionnement, détection des fuites, etc.).

Les entreprises qui ont été sélectionnées devaient donc correspondre au mieux aux spécifications énoncées précédemment.

Les caractéristiques des usines retenues, de leurs activités, du nombre d'ouvriers participant aux essais et les solvants dosés pour évaluer la fuite des masques sont résumées dans le [tableau II](#).

2.2. Déroulement de l'expérimentation

Les tests visant à mesurer la fuite d'un appareil anti-gaz ont tous été réalisés tels qu'ils sont décrits au § 1.2.

Pour l'ensemble des essais, une assistance était fournie à chaque ouvrier pendant l'essai afin de surveiller l'ensemble du dispositif de prélèvement.

Il a été vérifié que les filtres anti-gaz utilisés étaient compatibles avec les produits manipulés.

Étude générale de l'efficacité des masques

Dans les entreprises A, B, C et F, la durée moyenne d'utilisation des masques anti-gaz était d'environ 2 h par jour et par salarié.

Chaque ouvrier volontaire a testé au moins 4 masques dans ces entreprises. Parmi les masques proposés, figurait évidemment le modèle habituellement utilisé dans chaque établissement par les salariés, les 3 appareils choisis pour l'étude (dont les masques complets) et en fonction de la disponibilité des ouvriers et du travail effectué, de 1 à 3 demi-masques supplémentaires.

La nécessité pour les travailleurs participant à l'étude d'assurer leur tâche, a eu pour conséquence des essais réalisés en fonction des opportunités de port des masques, plutôt que selon un schéma pré-établi.

TABLEAU I

CARACTÉRISTIQUES DES MASQUES TESTÉS - CHARACTERISTICS OF RESPIRATORS TESTED

Masque n°	Type de masque	Élément filtrant
1	complet	A2
2	complet	A2
3	demi-masque	A1
4	demi-masque	A1P1
5	demi-masque silicone	A2
6	demi-masque	A1P2
7	demi-masque	A1

TABLEAU II

DESCRIPTION DES ENTREPRISES ET PRODUITS DOSÉS - TYPES OF FACTORY AND NATURE OF COMPOUNDS TESTED (*)

Entreprise	Activité	Solvants dosés	Masques (**)	Nbre de pers.
A	Fabrication d'encre de sérigraphie	Acétate de méthoxypropanol aromatiques en C ₉	4	4
B	Fabrication de peintures	Toluène, acétate de n-butyle, aromatiques en C ₈	5	8
C	Mise en peinture de moteurs électriques	Toluène	4 et 6	6
D	Mise en peinture de moteurs électriques	Toluène, acétate de n-butyle, aromatiques en C ₈	7	2
E	Fabrication de matériaux composites	Styrène	4	4
F	Mise en peinture de matériaux composites	Toluène	4	6

(*) Les masques 1, 2, 3 imposés pour l'étude n'étaient pas utilisés dans ces entreprises.

(**) Habituellement utilisés.

Étude de 2 masques en utilisation intensive

En raison de l'opportunité qui s'est présentée dans deux entreprises (D et E), notamment l'utilisation intensive de la protection respiratoire, les tests décrits ci-après n'ont concerné que les masques habituellement utilisés par les salariés, soit respectivement les appareils 7 et 4.

Évolution de l'efficacité d'un masque

Dans l'entreprise D, deux peintres portaient un demi-masque pendant toute la durée du poste de travail. Cette particularité a été mise à profit pour suivre l'évolution de l'efficacité de leur masque au cours d'une journée de travail. Pour chacun des deux salariés, on a réalisé 7 essais

d'une durée moyenne de 45 minutes, espacés par des pauses. Chaque essai correspondait en fait à une nouvelle phase de leur travail.

Exposition des salariés avec et sans masque

Dans un atelier de l'usine E, où des pièces en résine polyester sont fabriquées, les ouvriers portent à leur convenance (plusieurs fois par jour) des protections respiratoires pour se protéger des vapeurs de styrène.

En raison des concentrations pouvant être élevées dans cet atelier, l'exposition des salariés a été mesurée lorsqu'ils portaient un masque anti-gaz mais également lorsqu'ils ne l'utilisaient pas.

Ces prélèvements, réalisés pendant toute la durée du poste de travail, avaient pour but de mesurer l'efficacité des masques employés et, d'autre part, de déterminer l'exposition réelle et potentielle de chaque ouvrier pendant une période de trois jours dans les conditions les plus réalistes possibles.

3. Résultats

Sauf indication contraire, les moyennes sont des moyennes arithmétiques.

Au total 134 couples de prélèvements ont été exploités correspondant à autant de mesures d'efficacité de masque.

3.1. Efficacités des masques par entreprise (cf. fig. 2)

Les essais ont été réalisés dans des conditions et paramètres identiques (mêmes travailleurs, polluants identiques à des concentrations voisines, même travail effectué, tests de durée équivalente).

Seul le nombre de tests par masque peut être légèrement différent en raison des opportunités de port des masques.

Pour chaque entreprise, la fuite moyenne de chaque masque testé est indiquée et permet d'établir les comparaisons.

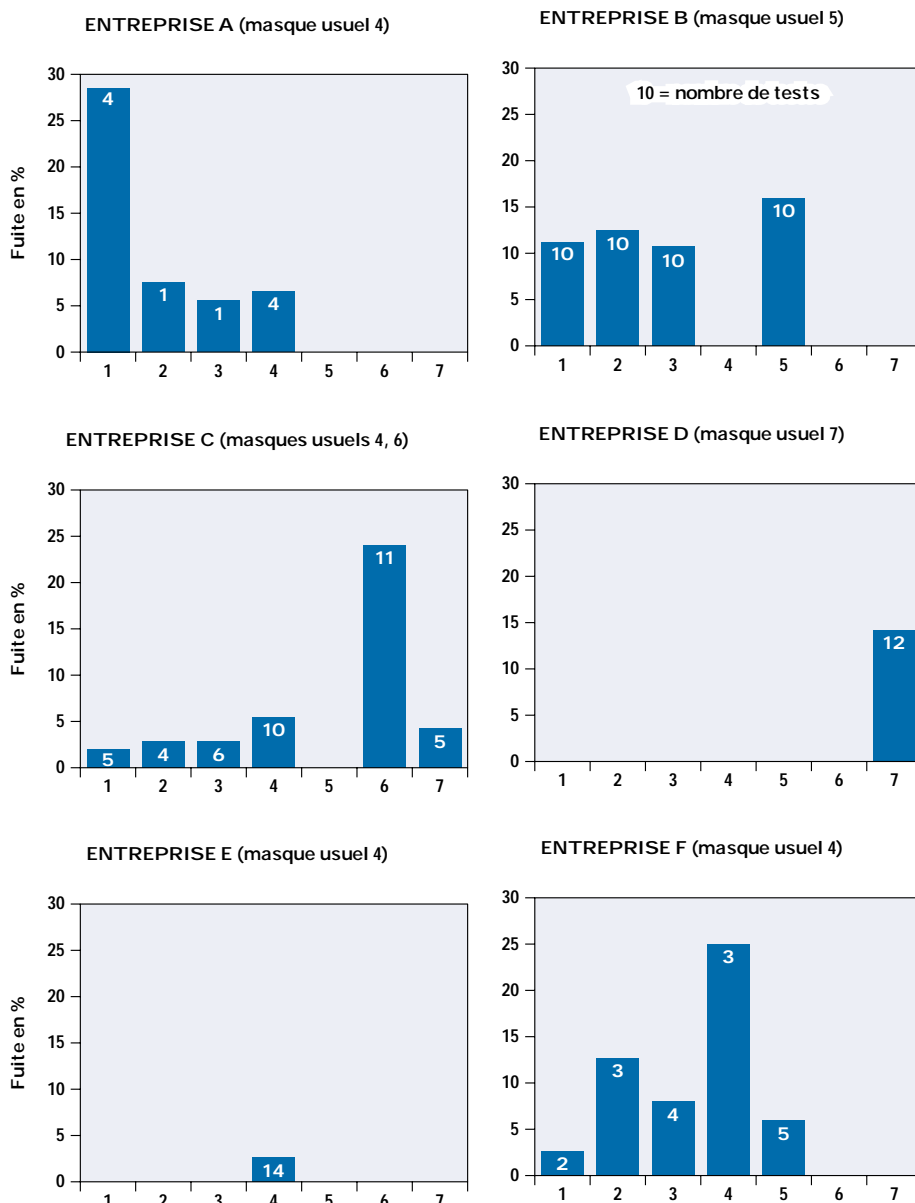


Fig. 2. Efficacité des masques dans les différentes entreprises - Efficiency of respirators in the different factories

3.2. Efficacités moyennes des masques (cf. tableau III et fig. 3)

Remarque

En raison des disparités liées à l'expérimentation en milieu industriel, les nombres de tests par masque et/ou par entreprise sont inégaux. Dans ces conditions, les valeurs représentant les fuites moyennes de chaque masque ne sont que des grandeurs indicatives qui résument les résultats de cette étude. Ces valeurs ne permettent pas d'établir un classement des appareils testés.

Pour chaque masque étudié, un test de Kolmogorov-Smirnov a été effectué sur les fuites calculées permettant de tester la distribution normale ou log-normale des résultats. La distribution log-normale convient effectivement pour 6 séries de résultats sur 7. Pour cette distribution, on calcule la moyenne (M_G) et l'écart type (S_G) géométrique ; à partir de ces paramètres, on estime la moyenne arithmétique d'une telle distribution à l'aide de l'estimateur [19] :

$$F_{\text{moy}} = \exp \{ \ln(M_G) + 0,5[\ln(S_G)]^2 \}$$

$\ln(M_G)$ et $\ln(S_G)$ représentent respectivement la moyenne et l'écart type des logarithmes des valeurs de fuite.

L'estimation de la moyenne arithmétique (F_{moy}) a été préférée à la moyenne géométrique (M_G) pour exprimer la fuite d'un masque en raison de l'étendue des mesures.

Dans le tableau III figurent la fuite moyenne pour chaque masque et l'étendue des mesures.

3.3. Efficacité d'un appareil au cours d'une journée (cf. fig. 4)

Dans l'entreprise D, où les peintres ne travaillaient pas sans protection respiratoire, les résultats ne permettent pas d'observer une efficacité croissante ou décroissante de leur appareil respiratoire au cours de la journée.

À noter que ces prélèvements réalisés durant un poste de travail ont permis de calculer, pour les deux salariés, les indices d'exposition potentielle (hors du masque). Ces indices nettement inférieurs à 1 (0,17 et 0,28) ne justifiaient pas impérativement le port d'un masque anti-gaz.

La figure 4 visualise pour un salarié ces résultats. On note que des écarts importants peuvent exister entre les efficacités mesurées pendant une journée. Ces écarts

TABLEAU III

FUIITE MOYENNE DES MASQUES - MEAN LEAKAGE OF RESPIRATORS

Masque n°	Type	Nbre de couples de mesures	Nbre de sujets ayant testé	Fuite moyenne (%) étendue des mesures	estimation de la moy. arithmétique (%)
1	complet	21	18	1 - 49	13
2	complet	18	15	1 - 31	11
3	demi-	21	18	2 - 17	8
4	demi-	31	17	< 1 - 30	8
5	demi-	15	10	4 - 21	15 (*)
6	demi-	11	5	10 - 42	25
7	demi-	17	5	1 - 37	12

(*) La distribution de ces résultats s'écarte sensiblement d'une distribution log-normale.

sont d'autant plus surprenants que les autres paramètres sont identiques. Ce constat peut probablement être attribué à la qualité de l'ajustement de la protection respiratoire sur le visage et/ou un déplacement de celle-ci favorisant alors une fuite accrue.

3.4. Exposition des salariés avec et sans masque (fig. 2 et 5)

Dans l'entreprise E, les résultats mettent en évidence le fait que les opérations liées à la mise en œuvre de la résine polyester sont très polluantes, puisque la valeur moyenne d'exposition au styrène est très

souvent dépassée, jusqu'à 290 mg/m³ (VME = 215 mg/m³), d'où la nécessité de porter une protection respiratoire. Le masque utilisé s'est d'ailleurs révélé efficace puisque sur 14 essais entrepris, sa fuite moyenne est de 3 % (fig. 2).

La campagne menée dans cette entreprise montre que le fait de porter un masque pendant les opérations les plus polluantes peut réduire considérablement l'exposition moyenne du sujet sur la journée.

Dans le cas illustré par la figure 5, l'exposition « réelle » en moyenne sur la journée de cet ouvrier est réduite d'un facteur 9 par rapport à ce qu'elle aurait été si ce dernier n'avait pas porté de masque.

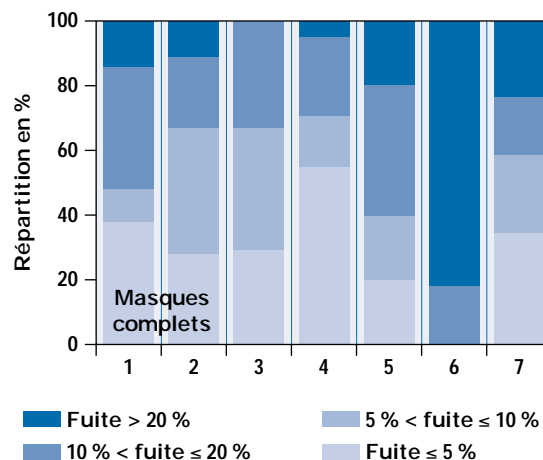


Fig. 3. Répartition des valeurs de fuite des masques - Distribution of respirator leakage values

4. Analyses statistiques des données

La variabilité des paramètres régissant des tests de masques en milieu industriel fait qu'il est difficile de comparer l'efficacité des appareils à partir de résultats globaux obtenus dans diverses entreprises comme ceux indiqués dans le tableau III.

Dans ces conditions, un traitement statistique de l'ensemble des données a été effectué, dans le but d'affiner les résultats concernant surtout la comparaison globale des masques. Cette analyse prend en compte les divers paramètres que sont la nature et la concentration des produits, les masques utilisés et les individus (effet individuel).

4.1. Modèle utilisé

Pour un masque donné, la fuite mesurée (F) dépend de sa fuite réelle (f), de l'absorption pulmonaire des polluants et de l'individu qui porte ce masque. Un modèle statistique a été utilisé pour déterminer l'influence de ces paramètres.

Le modèle utilisé est le suivant :

$$C_{\text{int}} = f \cdot r \cdot i \cdot C_{\text{ext}}$$

où f représente le coefficient de fuite du masque correspondant à la fuite réelle, r étant le coefficient lié à la rétention ou l'absorption pulmonaire d'un polluant gazeux et i désigne un coefficient aléatoire propre à chaque individu et à chaque port de masque que l'on appelle effet individuel, C_{int} et C_{ext} étant les concentrations mesurées à l'intérieur et à l'extérieur du masque.

Ainsi pour chaque masque, on peut considérer qu'il existe une fuite moyenne, mais que la fuite observée pour chaque individu est obtenue en multipliant cette fuite moyenne par un coefficient aléatoire.

En faisant l'hypothèse couramment employée en hygiène industrielle que les mesures suivent une loi log-normale, il est possible d'utiliser les procédures statistiques classiques (modèle linéaire et analyse de la variance pour identifier les paramètres du modèle) [19].

Pondération des mesures

Comme pour le calcul des fuites (cf. § 1.5) lorsqu'il y avait plusieurs polluants, les valeurs de chaque rapport ont été pondérées par les pourcentages respectifs des concentrations extérieures.

Cela a pour effet d'accorder une influence accrue à un polluant dont la concentration est prépondérante par rapport à un autre polluant en plus faible concentration.

Dans les analyses qui suivent, les valeurs sont pondérées par le logarithme de la concentration extérieure (auquel a été ajouté 1 pour que toutes les pondérations soient positives).

4.2. Résultats de l'analyse

Cette analyse a été effectuée à l'aide de la procédure MIXED de SAS [20].

Les tests de FISCHER (test F) indiquent que les trois effets sont significatifs ($p = 5\%$) :

- les masques présentent des fuites réelles différentes ;
- les produits en général ont des coefficients d'absorption différents ;
- les effets individuels sont mis en évidence.

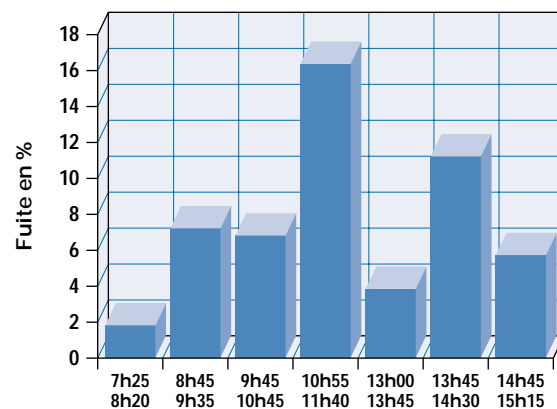
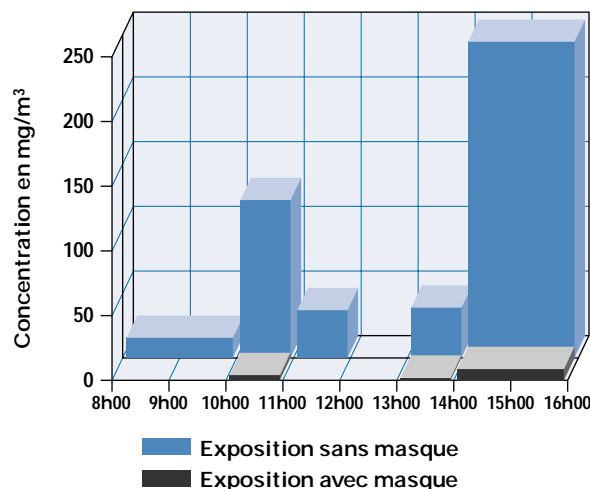


Fig. 4. Efficacité du masque n° 7 porté par un peintre au cours d'une journée de travail - Factory D: efficiency of respirator 7 worn by a painter for a working day



Concentrations en styrène
 08h20 - 10h00 : 11 mg/m³
 10h05 - 10h55 : 118 mg/m³
 11h00 - 11h45 : 32 mg/m³
 13h20 - 14h00 : 35 mg/m³
 14h15 - 15h30 : 239 mg/m³

Concentrations dans le masque
 10h05 - 10h55 : 2 mg/m³
 13h20 - 14h00 : 1 mg/m³
 14h15 - 15h30 : 10 mg/m³

Fig. 5. Usine E : Exposition d'un ouvrier au styrène avec et sans masque durant une journée - Factory E: exposure of an operative to styrene with and without respirator for a working day

Exposition moyenne réelle : 11 mg/m³, potentielle : 90 mg/m³

4.3. Efficacités comparées des masques (cf. tableau IV)

La comparaison des fuites réelles (f) de chaque masque par rapport à un masque de référence (le 4 étant choisi parce qu'il a été testé avec tous les produits) est présentée dans le tableau IV.

Le modèle linéaire permet de calculer la différence entre les « effets masque ». Les valeurs du tableau représentent le rapport de la fuite de chaque masque à celle du masque 4. L'intervalle de confiance à 95 % est indiqué.

Les masques sont classés dans l'ordre croissant du rapport (ou dans l'ordre décroissant de la performance).

4.4. L'absorption pulmonaire (cf. tableau V, fig. 6)

Le dosage de plusieurs polluants, pour déterminer la fuite d'un masque en situation réelle, a mis en évidence que les rapports (C_{int}/C_{ext}) des différents polluants n'étaient pas toujours identiques malgré les incertitudes analytiques pouvant atteindre 30 % en cas de très faible concentration [21].

Lorsque plusieurs polluants ont été dosés simultanément, on a déterminé les coefficients linéaires de régression des concentrations « intérieures » sur les concentrations « extérieures ».

Dans l'entreprise A, un ester (l'acétate de méthoxypropanol ou PMA) ainsi que 7 hydrocarbures aromatiques en C_9 provenant d'un mélange industriel ont été dosés. On a remarqué que pour l'ensemble des essais réalisés dans cette usine et quel que soit le masque utilisé, il existait uniquement pour les hydrocarbures une corrélation entre les concentrations mesurées à l'intérieur du masque et celles mesurées à l'extérieur. Sur 10 tests pratiqués, la moyenne des coefficients de corrélation est supérieure à 0,99. Un exemple est illustré par la figure 6.

Des résultats similaires ont été observés dans une autre entreprise avec un mélange d'éthylbenzène et de xylènes. Les rapports (C_{int}/C_{ext}) sont voisins pour l'ensemble de ces hydrocarbures aromatiques en C_8 alors que les rapports concernant le toluène sont plus faibles en moyenne (cf. tableau V).

L'analyse statistique établie sur l'ensemble des données permet de confirmer que les produits dans leur ensemble présentent des coefficients d'absorption pulmonaire différents. Cependant, il faut noter deux exceptions : la même analyse confirme que les hydrocarbures aromatiques en C_8 et en C_9 ont respectivement des coefficients d'absorption identiques.

5. Discussion

L'étude met en évidence :

- l'efficacité très variable des masques en situation industrielle réelle ;
- un classement assez peu sélectif des masques, excepté un appareil ;
- une efficacité des masques complets, qui n'est pas meilleure que celle des demi-masques.

5.1. Variations de l'efficacité des masques

Au cours de cette étude, l'ensemble des mesures a permis de montrer que l'efficacité des masques anti-gaz est très variable en milieu industriel.

Les résultats dépendent de tous les paramètres déjà cités plus haut.

L'efficacité d'un masque peut varier fortement d'un individu à l'autre. Les fuites moyennes déterminées pour chaque masque ne doivent pas dissimuler l'amplitude parfois considérable entre les résultats des différents essais pour un appareil donné. Pour le masque 1, les fuites varient entre 1 et 50 %, tous paramètres confondus.

On observe aussi une grande variabilité de l'efficacité moyenne des masques en fonction des entreprises (cf. fig. 2). Par exemple, pour le masque 4 nous n'avons pas d'explication pour les différences de fuite constatées dans les entreprises C et F

TABLEAU IV

RAPPORT DES FUITES RÉELLES DES MASQUES AVEC CELLE DU MASQUE DE RÉFÉRENCE 4 - REAL RATIO OF TEST RESPIRATORS TO REFERENCE RESPIRATOR 4

Masque n°	Fuite relative /masque n°4	Borne inf. (95%)	Borne sup. (95%)
4	1	-	-
1	1,11	0,67	1,49
3	1,16	0,70	1,56
2	1,24	0,74	1,69
7	1,87	0,97	2,77
5	1,88	1,10	2,59
6	8,05	3,92	12,34

TABLEAU V

USINE B, MASQUE 1 : RAPPORT DES CONCENTRATION INTÉRIEURES/EXTÉRIEURES POUR CHAQUE COMPOSÉ (*) - FACTORY B, RESPIRATOR 1: RATIO OF INSIDE TO OUTSIDE CONCENTRATIONS OF EACH COMPOUND

n° essai	C_{int}/C_{ext} (%)					Fuite en % $\frac{\sum(C_{int})}{\sum(C_{ext})}$
	Toluène	Acétate de butyle	Ethylbenzène	m- + p-Xylène	o-xylène	Ensemble des produits
1	6	6	7	<u>7</u>	6	6
2	3	5	4	5	4	5
3	10	9	9	10	<u>10</u>	9
4	7	10	10	12	<u>14</u>	11
5	10	15	18	<u>23</u>	20	17
6	9	18	16	19	<u>21</u>	18
7	7	9	14	<u>18</u>	15	11
8	5	11	11	13	<u>15</u>	11
9	7	11	10	<u>13</u>	10	11

(*) Les rapports les plus importants sont soulignés.

(respectivement 6 et 25 %), alors que les polluants étaient identiques à des concentrations pratiquement équivalentes. En revanche, l'excellente performance moyenne de ce masque dans l'usine E peut être expliquée par la concentration élevée du styrène ainsi qu'à son odeur peu agréable, qui ont probablement favorisé un port plus attentif du masque.

On remarque également que les résultats concernant un masque donné peuvent être très fluctuants pour un même sujet. Par exemple dans l'entreprise D, la fuite du masque 7 varie de 2 à 16 % pour le même ouvrier, les autres paramètres étant identiques (même travail, mêmes polluants, port du masque d'une durée équivalente).

5.2. Performances et classement des masques

L'étude montre qu'à l'exception du masque 6, qui a des performances moyennes médiocres, la fuite moyenne de l'ensemble des appareils est voisine de 10 %.

C'est le demi-masque 4, le plus couramment utilisé, qui obtient les meilleures performances globales avec 8 % de fuite moyenne pour 31 essais. Cette valeur est essentiellement imputable aux bons résultats obtenus dans l'usine E. Il aurait donc été intéressant de tester également les autres modèles vis-à-vis du styrène dans la même entreprise.

L'analyse statistique de l'ensemble des données ne permet pas de calculer les fuites moyennes et réelles des appareils respiratoires, compte tenu de l'ensemble des paramètres régissant le modèle linéaire. En revanche, cela a permis de hiérarchiser les masques à partir de leurs fuites réelles relatives par rapport à l'un d'entre eux. Ce mode de classement plus élaboré, puisqu'il prend en compte tous les paramètres (masques, produits et effets individuels), apporte des modifications mineures par rapport un classement qui résulterait des fuites moyennes mesurées (cf. tableau III).

5.3. Efficacité des masques complets

Au cours de cette campagne, les masques complets 1 et 2 ne se sont pas révélés globalement plus efficaces que l'ensemble des demi-masques, à l'except-

tion du modèle 6. Cette valeur est élevée par rapport à celles données dans la littérature situées généralement entre 2 et 4 %. Aucun élément technique ne permet d'expliquer les performances médiocres des appareils complets par rapport à ce qu'on pouvait attendre et par rapport également aux performances des demi-masques. Ces résultats sont probablement liés à un problème d'acceptabilité des masques par les salariés qui les ont essayés et qui n'en portaient jamais de façon habituelle au cours de leur travail.

5.4. Limite de la méthode de tests des masques

Bien que ne constituant pas un objectif initial de l'étude, la multi-pollution gazeuse a confirmé le biais apporté aux résultats par l'adsorption/rétention pulmonaire des vapeurs organiques. L'hypothèse selon laquelle l'absorption pulmonaire dépend de la nature du polluant a pu être confirmée par l'analyse statistique de l'ensemble des résultats.

C'est probablement en raison de leurs structures moléculaires voisines, que les hydrocarbures aromatiques en C₉ ont des coefficients d'absorption identiques avec en conséquence des rapports (C_{int}/C_{ext}) identiques pour chacun d'entre eux. Pour

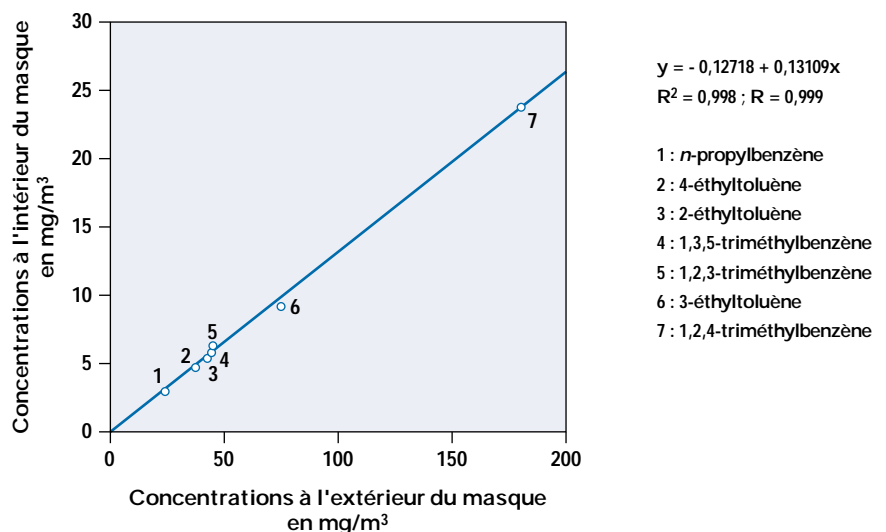
les hydrocarbures en C₈, les conclusions sont identiques, avec toutefois des résultats moins significatifs en raison du nombre réduit des isomères.

CONCLUSIONS

La fuite des demi-masques mesurée au cours de cette étude est d'environ 10 % ce qui correspond approximativement à la fuite mesurée pour les demi-masques anti-poussières au cours de l'étude menée précédemment à l'INRS et aux données de la littérature. Ce résultat confirme que la fuite n'est généralement pas due à des performances insuffisantes du support de filtration (masques anti-poussières) ou d'absorption (masques anti-gaz), mais à un défaut d'étanchéité au visage. On n'a pas en revanche mis en évidence de différence pour les masques complets, dont la fuite est également d'environ 10 %.

Les performances des masques anti-gaz sont également très variables sur le terrain. Pour cette raison, on ne peut prévoir l'efficacité d'un appareil dans une situation donnée et il est plutôt préférable de parler de la gamme d'efficacité qu'il peut avoir. Pourtant, les masques étudiés à l'exception de 2 modèles peuvent être performants (fuite inférieure ou égale à 2 %).

Fig. 6. Usine A : test n° 14 : corrélation entre les concentrations intérieures et extérieures pour les hydrocarbures en C₉ - Factory A, test n° 14: correlation between pollutant levels inside and outside respirator for C₉ hydrocarbons



Dans les conditions de tests relatifs à l'étude, les masques anti-gaz ont apporté une protection supplémentaire aux salariés qui les portaient. Sauf à de rares exceptions, l'exposition potentielle mesurée seulement pendant 1 ou 2 h était inférieure à la VME. Mais les tests réalisés ne permettaient pas de déceler dans les ateliers des éventuels « pics » de pollution en référence aux VLE établies pour une durée de 15 min et qui peuvent nécessiter à eux seul le port d'un masque anti-gaz.

Au regard de l'ensemble des résultats, il est permis de s'interroger sur l'utilisation de ces appareils à ventilation libre face à des polluants gazeux beaucoup plus toxiques que ceux qui ont été rencontrés au cours de cette étude. Dans de telles conditions, seul un appareil à pression positive (ventilation assistée, voire adduction d'air) serait susceptible de convenir.

En conclusion l'utilisation de masques anti-gaz à ventilation libre n'apporte pas de solution totalement satisfaisante à un problème de pollution gazeuse dans l'industrie. Elle ne doit pas se substituer à une protection collective et ne devrait convenir que pour des faibles durées et pour des vapeurs peu toxiques."

Article reçu en janvier 1999, accepté en avril 1999

BIBLIOGRAPHIE

- HÉRY M., VILLA M., HUBERT G., MARTIN P. - Assessment of the performance of respirators in the workplace. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1991, 35, pp. 181-187.
- HÉRY M., MEYER J.P., VILLA M., HUBERT G., WROBEL R., GERBER J.M., HECHT G., HERRAULT J. FRANCOIS D. - Efficacité de demi-masques anti-poussières non ventilés en situation industrielle. *Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et sécurité du travail*, 1994, 154, pp. 21-23.
- HURÉ P. - Les filtres anti-gaz : Résultats de la 2^e campagne d'essais de l'INRS sur les filtres anti-gaz de protection respiratoire. *Travail et Sécurité, janv. 1989*, pp. 16-20.
- NF EN 141 - Appareils de protection respiratoire. Filtres anti-gaz et filtres combinés. Exigences, essais, marquage. *Paris-La Défense, AFNOR, avril 1991*, 13 p.
- NF EN 136 - Appareils de protection respiratoire. Masques complets. Exigences, essais, marquage. *Paris-La Défense, AFNOR, juin 1990*, 34 p.
- NF EN 140 - Appareils de protection respiratoire. Demi-masques et quarts de masques. Exigences, essais, marquage. *Paris-La Défense, AFNOR, juin 1990*, 31 p.
- LARSEN R.S. - A practical field method for measuring the effectiveness of intermittent respirator usage. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1986, 47, pp. A775-A776.
- KAWAI T., MIZUNUMA K., YASUGI T., HORIGUCHI S., IKEDA M. - Effective prevention of styrene monomer exposure by protective respirators in fiber reinforced plastics work. *Occupational Hygiene*, 1994, 1, pp. 153-161.
- LOF A. et coll. - The effectiveness of respirators measured during styrene exposure in a plastic boat factory. *International Archives of Occupational Environmental Health*, 1993, 65, pp. 29-34.
- FERNANDEZ J.G., CAPEROS J.R. - Etude expérimentale de l'absorption et de l'excrétion pulmonaire du styrène sur des sujets humains. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 1977, 40, pp.1-12.
- MYERS W.R., ALLENDER J., PLUMMER R., STOBBE T. - Parameters that bias the measurement of airborne concentration within a respirator. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1986, 47, 2, pp. 106-114.
- HINDS W.C., BELLIN P. - The effects of respirators dead space and lung retention on exposure estimates. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1993, 54, pp. 711-722.
- KALVIN K., SELVIN S., SPEAR R.C. - Variability in protection afforded by half-mask respirators against styrene exposure in the field. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1990, 51, pp. 625-637.
- JOHNSTON A.R., MYERS W.R., COLTON C.E., BIRKNER J.S., CAMPBELL C.E. - Review of respirator performance testing in the workplace : Issues and concerns. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1992, 53, pp. 705-712.
- WEBER R.A., MULLINS H.E., COLTON C.E., BIDWELL J.O., FIPP B.A. - 3M Occupational health and environmental safety division. - Gas/vapor workplace protection factor study - phase 1: protocol development. In : *Presentation at the American industrial hygiene conference and exposition (Boston, 1^{er} juin 1992)*.
- EBER R.A., MULLINS H.E., BIDWELL J.O., FIPP B.A. - 3M Occupational health and environmental safety division. Gas/vapor workplace protection factor study - phase 2 : the field test. In : *Presentation at the American industrial hygiene conference and exposition (Boston, 1^{er} juin 1992)*.
- HURÉ P. - Les appareils de protections respiratoire : Choix et utilisation. Paris, INRS, 1999, ED 780, 56 p.
- AICHISON J., BROWN J.A.C. - The lognormal distribution. *Cambridge, Cambridge University Press*, 1957.
- SEARLE S.R. - Linear models. *New York, John Wiley and Sons*, 1971.
- AS Institute - Technical report P-229, SAS/STAT (r) Software : changes and enhancements. Release 6.07, version 6, ed. 4, vol. 1. *Cary, SAS Institute Inc*, 1992, 620 p.
- POPENDORF W. - Error analysis in assessing respirator protection factors. *Application Occupational Environmental Hygiene*, 1995, 10, pp. 606-615.