

Comment bien évaluer la fuite faciale de masques respiratoires

Méthodes normatives, artificielles
ou méthodes de terrain ?

Note Scientifique & Technique n° 271

**Comment bien évaluer la fuite faciale
de masques respiratoires :**

**Méthodes normatives, artificielles
ou méthodes de terrain ?**

R. Rousseau, J.M. Iotti, A. Ouvrai, G. Hubert-Pelle, E. Silvente
Département Ingénierie des Procédés

Mai 2007

Note Scientifique & Technique n° 271

Comment bien évaluer la fuite faciale de masques respiratoires :

Méthodes normatives, artificielles ou méthodes de terrain ?

Résumé

L'évolution des exigences de sécurité applicables aux appareils de protection respiratoire (APR) tend vers une définition de protocoles normatifs représentatifs des situations de travail.

Dans ce contexte, cette note vise à expliquer les écarts constatés entre les performances de masques respiratoires mesurées sur le terrain et celles obtenues en laboratoire à l'aide d'une machine respiratoire. Des limites d'utilisation de cette machine sous sa forme actuelle ont été établies. Par ailleurs, le principe de détection d'aérosols choisi pour les essais s'est avéré prépondérant sur l'évaluation des performances des masques respiratoires. De plus, le durcissement des conditions de débits respiratoires et la prise en compte de la variable « gestes professionnels » sont des pistes de progrès pour les essais normatifs qui se dégagent de nos tests de laboratoire et de terrain. La méthode de quantification de la fuite faciale par comptage de particules (CNC) s'est révélée ainsi appropriée pour inter-comparer mesures d'ajustage de terrain et évaluations en laboratoire.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| 1. EXPOSE DES MOTIFS ET OBJECTIFS | 1 |
| 2. MATERIELS ET METHODES | 2 |
| 2.1 - Rappels du protocole normatif | 2 |
| 2.2 - Fonctionnement du banc d'essai de la fuite..... | 3 |
| 2.3 - Choix des débits ventilatoires (Dv)..... | 4 |
| 2.4 - Masques retenus pour les essais | 5 |
| 2.5 - Choix de l'appareil de mesure portatif (CNC-Portacount 8020 de TSI)..... | 5 |
| 3. RESULTATS PRINCIPAUX | 7 |
| 3.1 - Essais préliminaires de la machine à respirer avec un fonctionnement INSPIRATION - EXPIRATION | 7 |
| 3.2 - Essais retenus circuit INSPIRATION | 7 |
| 3.2.1 - Essais avec les masques complets..... | 7 |
| 3.2.2 - Analyses statistiques des données et discussions..... | 10 |
| 3.2.3 - Essais avec les demi-masques | 14 |
| 3.3 - Essais de terrain avec le dispositif CNC- Portacount..... | 14 |
| 4. CONCLUSION..... | 18 |
| 5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 19 |
| - ANNEXE - | 22 |

1. EXPOSE DES MOTIFS ET OBJECTIFS

Les performances des appareils de protection respiratoire filtrants sont la résultante de différentes caractéristiques qui sont principalement :

- la « fuite au visage » des pièces faciales ;
- l'« efficacité de filtration » particulière, antigaz ou combinés des filtres utilisés seuls ou en association avec les pièces faciales.

Ces performances sont généralement étudiées séparément, compte tenu du fait que l'utilisateur final peut utiliser une pièce faciale d'une origine conjointement avec un filtre d'une autre, l'association étant rendue possible par l'existence d'un raccord dit « standard » ou spécifique à une marque. Depuis la directive européenne 89/686/CEE et son application en droit français le 1^{er} janvier 1993, l'INRS est notifié pour vérifier, avec des bancs d'essais spécifiques, la certification des appareils de protection respiratoire.

Par ailleurs, des campagnes d'essais comparatifs réalisées en situation réelle de travail ont montré que les efficacités de protection respiratoire, mesurées avec un polluant représentatif de l'atmosphère de travail, n'étaient pas toujours suffisantes et que les appareils répondant à la même classe de protection pouvaient avoir des caractéristiques très différentes [1-10].

Cette présente étude se propose d'évaluer l'influence de la « fuite faciale » comme paramètre agissant sur les performances des masques. La fuite faciale est souvent provoquée par le plus ou moins bon contact avec le visage du porteur, de pièces faciales à pression négative de type « masque complet » ou « demi-masque ». De plus, nous avons étudié ce paramètre avec une approche de type variation des débits ventilatoires, comme facteur agissant en priorité sur la dégradation ou non de l'efficacité des masques.

Ainsi, une étude précédente [11] a mis en évidence que les efficacités mesurées sur deux types de masque à pression négative avec un protocole d'essai utilisant une tête factice Sheffield et une machine à respirer (MAR) étaient inférieures aux valeurs limites des normes européennes harmonisées correspondantes. De plus, nous avons montré une amélioration des performances des masques lors de débits ventilatoires plus importants, résultats pour les moins inattendus. Ce constat préliminaire est susceptible d'avoir des conséquences sur l'exposition aux polluants et d'être préjudiciable à la santé des travailleurs qui pensent être protégés par l'équipement de protection individuelle.

Le premier volet de cette note explicite en détails les résultats de cette étude sur un panel de masques complets et demi-masques et permet d'expliquer les écarts de pénétration constatés par rapport aux limites de certification.

Le second volet de la note propose une méthodologie de mesures de fuite faciale applicable au poste de travail, inspirée des protocoles normatifs. Les contraintes de mesurages en milieu industriel imposent l'usage d'un polluant réel, en substitution d'un agent d'essai de type chlorure de sodium. De plus, l'appareillage servant à la certification n'est pas transportable. Nous avons donc validé d'autres moyens de mesurages (de type compteur de particules). Enfin, la prise en compte du paramètre « gestes professionnels » au lieu du paramètre « variation du débit respiratoire » s'est avérée plus judicieuse pour l'étude de la fuite faciale avec un polluant sub-micronique.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 - Rappels du protocole normatif

La méthode de détermination de la fuite vers l'intérieur pour les appareils de protection respiratoire est cadrée par la norme NF EN13274-1 [12]. Le principe est illustré à la figure 1.

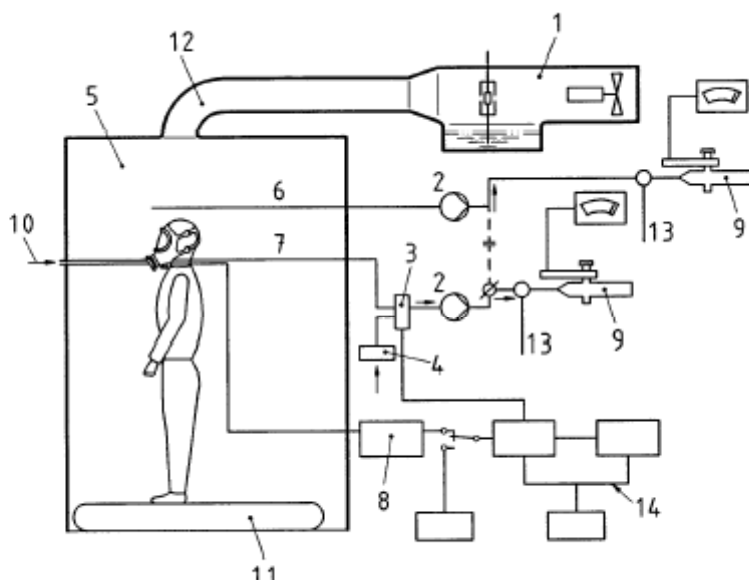


Figure 1. Montage d'essai pour déterminer la fuite faciale [18]

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 Atomiseur | 8 Manomètre |
| 2 Pompe | 9 Photomètre |
| 3 Vanne d'inversion | 10 Simulateur de référence à air frais |
| 4 Filtre | 11 Tapis roulant |
| 5 Cagoule/chambre | 12 Conduit et chicane |
| 6 Prélèvement de la cagoule/chambre | 13 Air additionnel |
| 7 Prélèvement de la pièce faciale | 14 Interface d'échantillon pulsé |

Les essais normatifs se déroulent dans une cabine de génération avec une concentration de l'agent d'essai NaCl à $8 \pm 4 \text{ mg.m}^{-3}$. Les sujets d'essais effectuent une série de 5 exercices (différents mouvements de têtes, récitation de l'alphabet) sur un tapis de marche à 6 km.h^{-1} . Une procédure de calcul automatique permet d'éditer les fuites pour chacun des exercices de simulation en tenant compte de la concentration résiduelle de NaCl dans le masque.

Les concentrations sont mesurées par un photomètre à flamme d'hydrogène à bas débit de prélèvement (PF Moores). La fuite du masque est le rapport entre la concentration de NaCl dans le masque, en phase inspiratoire et dans l'enceinte.

Une pièce faciale, de type masque complet, est conforme si la valeur de la fuite moyenne pour tous les sujets d'essais et tous les exercices est inférieure à 0,05 % (EN136:1998). Un demi-masque est conforme si la fuite moyenne pour chaque sujet sur 46 exercices est inférieure à 5 % et 8 des 10 moyennes par sujet inférieures à 2 % (EN140:1998).

2.2 - Fonctionnement du banc d'essai de la fuite

Ce banc est constitué d'une tête factice Sheffield, d'un circuit respirateur et d'une machine à respirer. Il peut fonctionner selon deux principes :

- en mode inspiratoire-expiratoire : les tuyauteries (1) et (2) sont reliées, le système fonctionne alors en circuit fermé ;
- en mode inspiratoire : les tuyauteries (1) et (2) sont déconnectées afin de s'affranchir des artefacts causés par le fonctionnement en circuit fermé.

Le circuit « respirateur » utilisé lors de la précédente étude [11] a été entièrement modifié pour réduire ses dimensions et garantir une parfaite étanchéité des conduites. Cette partie du circuit est désormais entièrement rigide. L'étanchéité du montage a été testée lors d'essais de fuite à l'hélium. Cependant, il s'est avéré impossible de rendre étanche la partie « humidification » de ce respirateur au niveau du bloc de chauffage. Nous n'avons donc pu réaliser que des essais avec un air à humidité ambiante. Par ailleurs, comme nous l'expliquerons dans le § 3 « Résultats principaux », la sortie expiratoire du respirateur est dirigée dans la cabine : le flux d'air expiratoire ne passe plus vers la tête (les coudes (1) et (2) de la figure 2 ne sont plus connectés). Cependant, une soupape bloquante empêche toute entrée d'air dans le circuit.

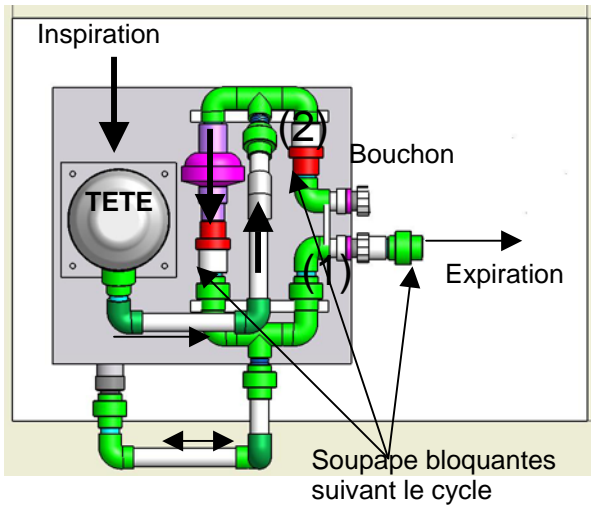


Figure 2. Schéma de principe et photographie du respirateur

2.3 - Choix des débits ventilatoires (D_v)

Pour les essais, nous avons retenu des débits moyens ventilatoires (D_v) représentatifs de situations réelles de travail [13]. Comme les dégradations de fuites avaient été obtenues à de faibles débits ventilatoires (inférieurs ou égaux à $20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$), nous avons aussi pris en compte cette situation de respiration normale sans effort. Le tableau 1 décline, suivant neuf couples de rythme F ($\text{cycles}\cdot\text{min}^{-1}$) et volume V ($\text{L}\cdot\text{cycle}^{-1}$), des valeurs de débits, respectivement 15 , 30 et $60 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Les valeurs sont des valeurs moyennes de débits ventilatoires sinusoïdaux en sortie de la machine. Les débits de pointe pouvant être simulés avec la machine à respirer sont obtenus en multipliant le débit moyen par π ($D_{\text{crête}} = \pi \cdot D_v$ en fonctionnement sinusoïdal). Ces valeurs plus importantes de débits sont actuellement prises en compte dans plusieurs études [14-17] et dans les normes ISO 8996 et 16976-1 portant sur les activités de travail à simuler dans les exercices de fuite faciale.

| $D_v = 15 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ | | $D_v = 30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ | | $D_v = 60 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ | |
|--|---|--|---|--|---|
| F ($\text{cycles}\cdot\text{min}^{-1}$) | V ($\text{L}\cdot\text{cycle}^{-1}$) | F ($\text{cycles}\cdot\text{min}^{-1}$) | V ($\text{L}\cdot\text{cycle}^{-1}$) | F ($\text{cycles}\cdot\text{min}^{-1}$) | V ($\text{L}\cdot\text{cycle}^{-1}$) |
| 7 | 2,14 | 15 | 2 | 24 | 2,5 |
| 10 | 1,5 | 20 | 1,5 | 30 | 2 |
| 15 | 1 | 30 | 1 | 40 | 1,5 |

Tableau 1. Couples rythme et volume respiratoire appliqués aux débits ventilatoires

2.4 - Masques retenus pour les essais

Les masques retenus pour l'étude sont des masques du commerce, en général de taille moyenne. Ils ont reçu un visa d'examen « CE » de type, suivant les normes européennes harmonisées EN 136 [18] et EN140 [19] respectivement pour un masque complet et un demi-masque.

Les sept masques complets testés (référencés MC1 à MC7 dans les tableaux de résultats) sont constitués de pièces faciales en matériau souple de type élastomère EPDM ou silicone. Les quatre demi-masques sont référencés DM1 à DM4 et bien entendu certifiés suivant EN 136.

Tous ces masques sont équipés de filtres très haute efficacité afin d'évaluer la fuite des appareils de protection respiratoire uniquement en termes de fuite faciale :

- les masques avec raccord vissant Rd40 sont munis d'un filtre P3 dont la pénétration moyenne mesurée dans les conditions de la norme EN143 est de 0,0007 % ;
- les masques à raccord type baïonnette sont équipés de deux filtres spécifiques EN143 (pénétration mesurée de 0,0008 %).

Nous avons réalisé des essais de "fuite totale vers l'intérieur" pour chacun des masques choisis en nous limitant à trois essais par masque au lieu de dix compte tenu du temps imparti pour l'étude et de la disponibilité des médecins investigateurs nécessaires à l'application de la loi Huriet. Toutes les valeurs obtenues sont conformes aux recommandations de la norme d'essai EN 13274-1.

2.5 - Choix de l'appareil de mesure portatif (CNC-Portacount 8020 de TSI)

Dans la perspective d'essais en entreprises, nous avons recherché un instrument de mesure transportable. Nous nous sommes orientés, pour la mesure de fuite, vers un compteur de particules à noyau de condensation (CNC) autonome. Cet instrument [20], unique sur le marché, est utilisé principalement dans les pays anglo-saxons pour réaliser des mesures quantitatives d'ajustage de masque individuel dans les entreprises (appelés communément « fit test »). Cet appareil, en mesurant simultanément la concentration en nombre de particules par cm^3 dans l'environnement ambiant de l'opérateur et dans le masque, permet de calculer le ratio $\text{C}_{\text{ambiant}}/\text{C}_{\text{masque}}$ appelé Fit Factor (FF). Ce rapport est l'inverse de la fuite retenue dans les normes européennes, soit $\text{FF} = 1/P$. A titre d'exemple, une valeur de fuite faciale de 0,05 % pour un masque complet correspond à une valeur de Fit de 2 000.

Un logiciel, associé à cet appareillage, permet d'acquérir et de calculer directement, à partir d'une série d'exercices de simulation (différents des exercices européens par l'absence de marche forcée), la fuite totale vers l'intérieur (T.I.L. pour Total Inward Leakage). La formule générale qui relie le TIL aux facteurs cumulatifs de fuites au niveau d'un masque respiratoire à pression négative est rappelée ci-après :

$$\text{T.I.L.} = \text{Fvi} + \text{Fcf} + \text{Fex} + \text{Fd}$$

avec

- Fvi : fuite faciale au visage,
- Fcf : fuite à travers le filtre à particules,
- Fex : fuite à travers la valve d'expiration,
- Fd : toute autre fuite non identifiée.

Les caractéristiques de cet instrument sont les suivantes :

- gamme granulométrique entre 0,02 μm et plus de 1 μm ;
- gamme de concentration entre 0,01 et $5 \cdot 10^5$ particules. cm^{-3} ;
- précision du FF (Cambiant/Cmasque) de ± 10 %.

Comme tout compteur de particules, cet instrument ne différencie pas les particules. Il prend en compte aussi bien les particules ambiantes que celles expirées éventuellement par la bouche de l'opérateur, les fumeurs par exemple. Ce léger inconvénient, cité dans plusieurs études [21-24], est limitant si la concentration ambiante est faible. Le constructeur impose une présence minimale en ambiance de 1 500 particules. cm^{-3} , valeur facilement détectée dans un atelier pollué où règne généralement une concentration dix fois plus élevée.

Cet appareillage est très largement utilisé et cité dans de nombreuses études du NIOSH [25-28] et, depuis quelques années, par le H.S.L. Celles-ci visent à rechercher une corrélation entre le facteur de protection mesuré in-situ et les valeurs du FF (Fit Factor) lors d'exercices de simulation de travail. Avec cet appareil, nous avons pu, sur un sujet d'essai, tester l'influence d'une fuite volontaire sur un masque complet à l'emplacement d'une ancienne sonde de prélèvement non parfaitement obturée. La détection de la fuite par l'appareil est alors remarquable ($\text{FF} < 100$ avec ou sans génération de sel) alors que ce masque est conforme initialement ($\text{FF} \gg 2\ 000$). De plus, durant tous nos essais, nous avons pu apprécier les performances du CNC type Portacount car il permet de déceler, en quasi-temps réel, une pose de masque déficiente sur la tête factice. Cet avantage a été déterminant pour les demi-masques et pour deux masques complets qui présentent, de par leur configuration d'élastomère, une étanchéité délicate à faire sur la tête Sheffield.

3. RESULTATS PRINCIPAUX

3.1 - Essais préliminaires de la machine à respirer avec un fonctionnement INSPIRATION - EXPIRATION

Dans les conditions de fonctionnement identiques aux essais conduits par Martin et al [11], c'est-à-dire en cycles inspiratoire - expiratoire dans un circuit respirateur fermé, les essais préliminaires avec un masque complet n'ont pas conduit à l'obtention de fuites inférieures à 0,05 % ou équivalent à $FF > 2\ 000$. De plus, en simulant un masque parfait, nous n'avons pu obtenir les valeurs attendues. Seul un fonctionnement en mode inspiratoire du circuit a permis de mesurer des valeurs très faibles de pénétration. Ce phénomène s'explique par une re-circulation des particules présentes dans tout le circuit du montage (MAR et conduites). En effet, ce circuit, pour des raisons de simplicité pour le transport, ne comporte pas d'électro-vannes pouvant séparer nettement la conduite inspiratoire de la conduite expiratoire. Il y a donc une possibilité de rétention des particules au cours du temps, dommageable pour mesurer de faibles fuites. Cet artefact pourrait aussi expliquer les valeurs anormalement élevées de fuites trouvées lors de la précédente étude.

3.2 - Essais retenus circuit INSPIRATION

3.2.1 - Essais avec les masques complets

Les essais, décrits ci-dessous, correspondent à des mesurages sur un circuit en mode inspiratoire. Pour chacun des masques, nous avons mesuré l'influence du débit ventilatoire, y compris les paramètres associés : volume et rythme respiratoires. Ces tests d'influence ont été menés avec plusieurs concentrations ambiantes dans la cabine :

- utilisation de particules ambiantes présentes dans l'atelier d'essai, soit entre 7 000 et 20 000 $p.cm^{-3}$ suivant les journées d'expérience (cf. tableau 2) ;
- utilisation d'une solution mère de génération de concentration égale à 0,4 % de NaCl pour ne pas saturer l'appareil de mesure CNC (cf. tableau 3) ;
- utilisation d'une solution mère de génération à 2 % de NaCl spécifiée dans la norme EN 13274 (2001) avec mise en place d'un étage de dilution sur la concentration ambiante dans la cabine lors des mesures avec le Portacount (cf. tableau 4). Le tableau 5 mentionne les résultats de mesures avec le photomètre de flamme. Ce dernier cas nous permet alors de comparer les réponses en termes de fuites entre le photomètre de flamme Moores et le CNC-Portacount.

Pour chacun des masques, les données ont été testées par une analyse statistique de type ANOVA pour émettre des hypothèses de linéarité fortes entre les paramètres FF (ou 1/P), débit (Dv), F (rythme respiratoire) et V (volume) à un niveau de confiance d'au moins 95 % ($P < 0,05$).

| Dv | F | V | MC1 | MC2 | MC3 | MC4 | MC5 | MC6 | MC7 |
|----|----|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 15 | 15 | 1,0 | 31 800 | 11 400 | 49 200 | 34 700 | 24 000 | 48 200 | 19 300 |
| | 10 | 1,5 | 44 000 | 14 200 | 46 200 | 38 500 | 16 500 | 47 300 | 12 500 |
| | 7 | 2,1 | 40 400 | 16 100 | 46 100 | 32 800 | 21 500 | 24 100 | 10 800 |
| 30 | 15 | 2,0 | 23 900 | 11 200 | 43 600 | 22 100 | 9 410 | 32 700 | 13 500 |
| | 20 | 1,5 | 23 000 | 11 100 | 40 900 | 25 200 | 11 100 | 28 500 | 16 700 |
| | 30 | 1,0 | 23 300 | 10 200 | 37 600 | 21 000 | 10 300 | 18 700 | 14 400 |
| 60 | 24 | 2,5 | 12 700 | 12 600 | 19 600 | 28 399 | 7 260 | 6 320 | 4 310 |
| | 30 | 2,0 | 13 800 | 12 200 | 14 800 | 22 400 | 7 960 | 6 140 | 3 590 |
| | 40 | 1,5 | 12 000 | 14 400 | 23 300 | 30 900 | 7 440 | 4 980 | 3 670 |

Tableau 2. Valeurs des FF (1/P) mesurées avec le CNC Portacount8020 dans la cabine sans sel

Remarque : les variations de la concentration ambiante de l'atelier sur une journée sont inférieures à 10 % de la valeur moyenne. D'un jour à l'autre, la teneur ambiante peut varier de 7 000 à 20 000 particules.cm⁻³. Les valeurs concernant le masque « MC5 » sont obtenues après un positionnement très précis sur la tête factice pour limiter la fuite, notamment au niveau des tempes.

| Dv | F | V | MC1 | MC2 | MC3 | MC4 | MC5 | MC6 | MC7 |
|----|----|------|-------|--------|--------|--------|-----|--------|-------|
| 15 | 15 | 1 | 7 920 | 5 540 | 24 800 | 15 000 | 981 | 30 500 | 4 180 |
| | 10 | 1,5 | 8 910 | 5 270 | 23 500 | 12 400 | 967 | 22 000 | 3 690 |
| | 7 | 2,14 | 8 080 | 6 280 | 18 700 | 8 330 | 988 | 30 200 | 3 020 |
| 30 | 15 | 2 | 5 090 | 8 310 | 18 600 | 7 500 | 710 | 19 900 | 3 060 |
| | 20 | 1,5 | 4 850 | 7 750 | 19 600 | 7 160 | 694 | 18 700 | 3 240 |
| | 30 | 1 | 4 710 | 7 140 | 17 600 | 7 260 | 726 | 17 500 | 3 040 |
| 60 | 24 | 2,5 | 5 690 | 14 300 | 14 100 | 4 380 | 432 | 4 210 | 1 640 |
| | 30 | 2 | 5 330 | 14 300 | 13 800 | 4 520 | 444 | 4 200 | 1 620 |
| | 40 | 1,5 | 5 170 | 14 400 | 13 100 | 4 020 | 446 | 3 980 | 1 710 |

Tableau 3. Valeurs des FF (1/P) mesurées avec le CNC Portacount 8020 dans la cabine avec génération de particules de sel à partir d'une solution mère à 0,4 % de NaCl

| Dv | F | V | MC1 | MC2 | MC3 | MC4 | MC5 | MC6 | MC7 |
|----|----|------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 15 | 15 | 1 | 11 700 | 7 390 | 5 640 | 5 290 | 1 010 | 30 900 | 8 800 |
| | 10 | 1,5 | 12 000 | 8 430 | 7 770 | 3 300 | 1 000 | 27 600 | 9 640 |
| | 7 | 2,14 | 9 670 | 6 190 | 8 820 | 2 910 | 1 030 | 23 400 | 8 710 |
| 30 | 15 | 2 | 8 360 | 4 150 | 6 150 | 2 670 | 430 | 21 800 | 7 980 |
| | 20 | 1,5 | 8 440 | 3 890 | 5 860 | 3 550 | 410 | 22 700 | 9 000 |
| | 30 | 1 | 6 510 | 3 820 | 5 740 | 3 650 | 430 | 23 500 | 9 870 |
| 60 | 24 | 2,5 | 4 980 | 3 640 | 4 750 | 3 650 | 230 | 6 590 | 3 800 |
| | 30 | 2 | 5 080 | 3 350 | 4 500 | 3 390 | 220 | 7 230 | 3 840 |
| | 40 | 1,5 | 4 620 | 3 620 | 4 050 | 2 980 | 210 | 6 630 | 3 770 |

Tableau 4. Valeurs des FF (1/P) mesurées avec le CNC Portacount 8020 dans la cabine avec génération de particules de sel à partir d'une solution mère à 2 % de NaCl

| Dv | F | V | MC1 | MC2 | MC3 | MC4 | MC5 | MC6 | MC7 |
|----|----|------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 15 | 15 | 1 | 6 250 | 1 900 | 8 850 | 10 990 | 4 770 | 2 640 | 3 810 |
| | 10 | 1,5 | 7 470 | 2 070 | 6 180 | 11 770 | 4 550 | 2 810 | 4 150 |
| | 7 | 2,14 | 9 100 | 1 970 | 7 300 | 9 100 | 4 770 | 3 540 | 4 120 |
| 30 | 15 | 2 | 10 420 | 1 910 | 5 620 | 10 760 | 4 680 | 3 590 | 4 470 |
| | 20 | 1,5 | 10 000 | 1 970 | 9 100 | 8 550 | 4 680 | 3 760 | 3 900 |
| | 30 | 1 | 11 120 | 2 000 | 9 100 | 11 500 | 4 430 | 3 590 | 6 810 |
| 60 | 24 | 2,5 | 12 500 | 2 440 | 10 870 | 11 120 | 5 110 | 3 810 | 6 720 |
| | 30 | 2 | 12 500 | 3 340 | 11 120 | 9 350 | 5 380 | 3 750 | 7 700 |
| | 40 | 1,5 | 11 770 | 3 420 | * | * | 5 000 | 4 570 | 8 200 |

* Valeurs non mesurées

Tableau 5. Valeurs des FF (1/P) mesurées en continu avec le photomètre de flamme Moores dans la cabine génération de particules de sel à partir d'une solution mère à 2 % de NaCl

Le tableau 6 indique les ratios des valeurs de fuite par instrument de mesures, soit la valeur du CNC sur la valeur du PF en fonction des masques et débits ventilatoires. Les masques ont des performances variables en termes de fuite. Le CNC-Portacount détecte, pour la majorité d'entre eux, une fuite plus faible lors du fonctionnement de la MAR à de faibles débits ventilatoires (15 L.min⁻¹). Inversement, aux plus forts débits (60 L.min⁻¹), le photomètre de flamme détecte une plus faible fuite.

| Débit | MC1 | MC2 | MC3 | MC4 | MC5 | MC6 | MC7 |
|-------|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|
| 15 | 1,9 | 3,9 | 0,6 | 0,5 | 0,2 | 11,7 | 2,3 |
| | 1,6 | 4,1 | 1,3 | 0,3 | 0,2 | 9,9 | 2,3 |
| | 1,1 | 3,2 | 1,2 | 0,3 | 0,2 | 6,6 | 2,1 |
| 30 | 0,8 | 2,2 | 1,1 | 0,2 | 0,1 | 6,1 | 1,8 |
| | 0,8 | 2,0 | 0,6 | 0,4 | 0,1 | 6,0 | 2,3 |
| | 0,6 | 1,9 | 0,6 | 0,3 | 0,1 | 6,6 | 1,5 |
| 60 | 0,4 | 1,5 | 0,4 | 0,3 | 0,05 | 1,7 | 0,6 |
| | 0,4 | 1,0 | 0,4 | 0,4 | 0,04 | 1,9 | 0,5 |
| | 0,4 | 1,1 | * | * | 0,04 | 1,5 | 0,5 |

*Valeurs non mesurées

Tableau 6. Ratios des valeurs de fuite CNC-Portacount sur photomètre de flamme Moores pour une solution mère à 2 % de NaCl

3.2.2 - Analyses statistiques des données et discussions

Le tableau 7 indique les statistiques (à partir de STATGRAPHICS®) d'un modèle de régression linéaire entre la fuite et l'augmentation des débits respiratoires, facteur principal de nos essais. Les valeurs sont données en fonction des trois cas décrits ci-dessus et pour chacun des instruments.

| | R carré | | | Probabilité | | | Coeff. Corrélation CNC | | |
|-----|---------|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|------------------------|------------|-----------------|
| | ambient | 0,4 % NaCl | 2 % NaCl | ambient | 0,4 % NaCl | 2 % NaCl | ambient | 0,4 % NaCl | 2 % NaCl |
| MC1 | 84% | 41,60% | 84,00% | <0,01 | <0,1 | <0,01 | -0,92 | -0,645 | -0,93 |
| MC2 | 0,30% | 98% | 61% | >0,1 | <0,01 | <0,01 | -0,05 | 0,989 | -0,78 |
| MC3 | 94% | 82% | 67,80% | <0,01 | <0,01 | <0,05 | -0,971 | -0,905 | -0,82 |
| MC4 | 18% | 72% | 5,70% | >0,1 | <0,01 | >0,1 | -0,425 | -0,848 | -0,24 |
| MC5 | 68% | 96% | 80% | <0,01 | <0,01 | <0,05 | -0,826 | -0,848 | -0,89 |
| MC6 | 78,40% | 94% | 94% | <0,01 | <0,01 | <0,05 | -0,885 | -0,97 | -0,97 |
| MC7 | 71% | 89% | 86% | <0,01 | <0,01 | <0,01 | -0,844 | -0,94 | -0,93 |
| | | | PFMoores | | | PFMoores | | | PFMoores |
| MC1 | | | 77,50% | | | <0,01 | | | 0,88 |
| MC2 | | | 70% | | | <0,01 | | | 0,84 |
| MC3 | | | 55,70% | | | <0,05 | | | 0,746 |
| MC4 | | | 1,55% | | | >0,1 | | | -0,124 |
| MC5 | | | 61% | | | <0,05 | | | 0,78 |
| MC6 | | | 58% | | | <0,05 | | | 0,763 |
| MC7 | | | 76% | | | <0,01 | | | 0,874 |

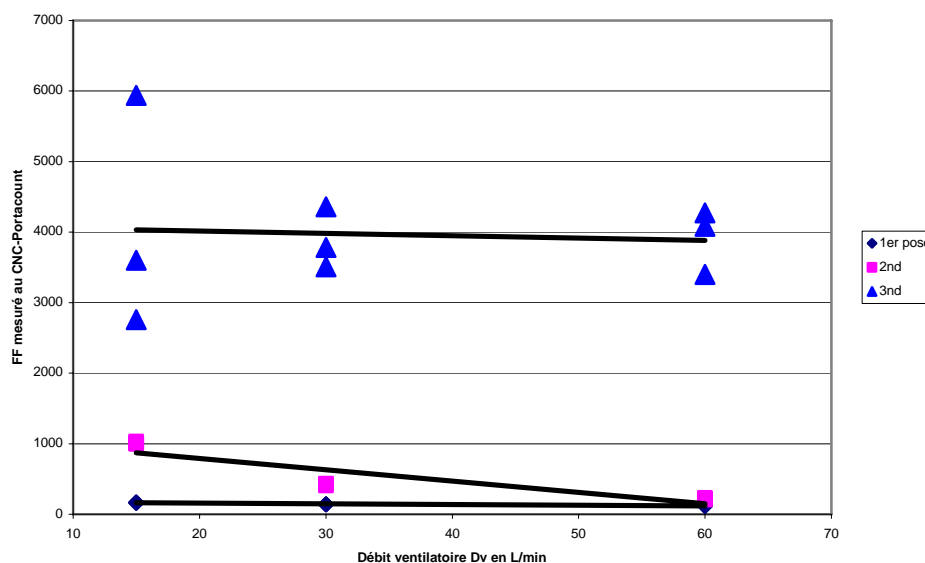
Tableau 7. Valeurs des R², des probabilités et coefficients de corrélation des analyses de régressions linéaires

Suite à cette analyse, on observe :

- une meilleure linéarité entre facteur de fuite et débit ventilatoire lors des essais avec le CNC-Portacount ;
- une influence prépondérante du facteur rythme respiratoire (F) sur l'efficacité mesurée par le CNC.

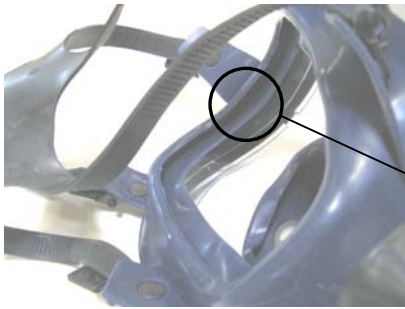
Les valeurs d'ajustage, mesurées dans cette configuration expérimentale, sont situées pour la plupart au-dessus des valeurs recommandées pour ce type de masque : $FF > 2\,000$, donc des fuites inférieures à 0,05 % et conformes aux exigences normatives. Il existe, pourtant, quelques anomalies observées sur certains masques et entre méthodes de mesure que nous détaillons ci-après.

Ainsi, le masque type « MC5 » présente des caractéristiques très différentes, suivant les poses, lors des essais avec une solution mère de génération à 2 % de NaCl (cf. graphe 1).

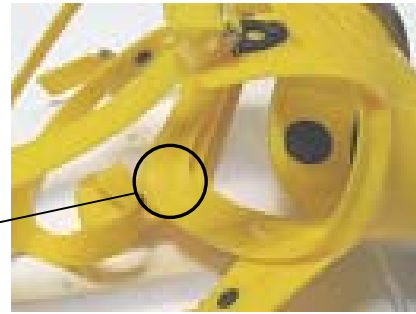


Graphe 1. Effets de plusieurs poses du masque « MC5 » sur la tête factice

Cette anomalie est révélatrice d'un masque pour lequel la tête factice s'avère inadaptée. Une forme d'élastomère inversée et rigide (pas de contact ventouse comme sur les autres masques complets, mais un contact tangentiel) est responsable de cette mauvaise étanchéité (cf. photographies 1 et 2). On notera, ici, que la pose de ce masque sur des sujets d'essais n'a pas révélé de fuites anormales, supérieures aux valeurs normatives.



joint facial différent

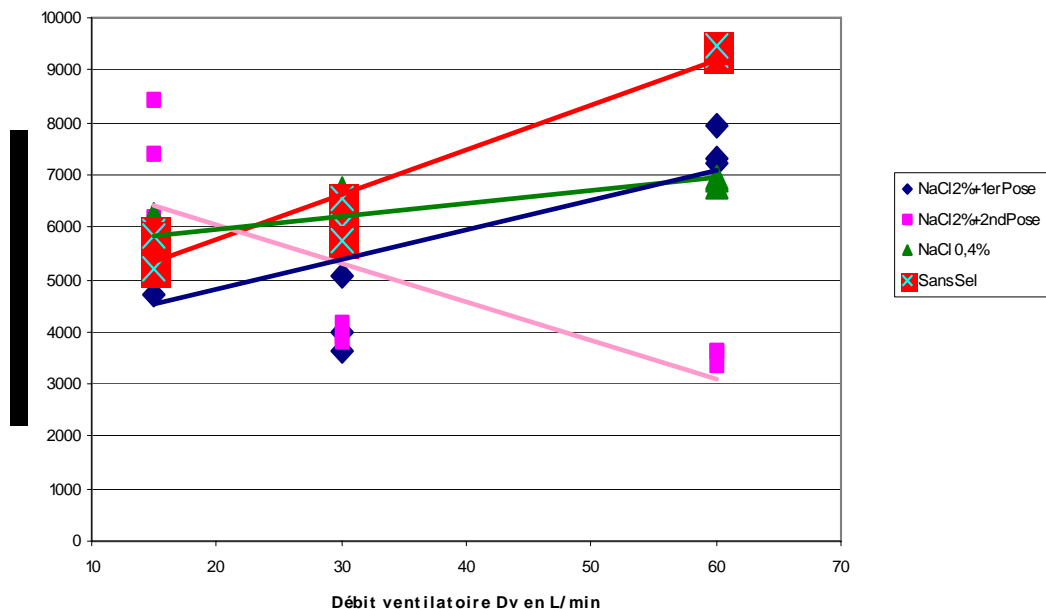


Photographie 1 - Masque « MC5 »

Photographie 2 - Masque « MC2 »

Par ailleurs, lors des mesures avec le CNC-Portacount, le masque « MC2 » présente, suivant diverses poses et concentrations de NaCl, une pente différente comme indiqué sur le graphe 2.

La fuite, en fonction des débits ventilatoires, diminue (sauf pour une série d'essais avec un changement de pose) lorsque les débits augmentent, comme cela se produit lors des mesures avec le photomètre de flamme pour tous les masques. Ce masque possède un élastomère très souple, sans doute à l'origine de ce changement de pente lors des essais avec la tête factice.



Graphe 2. Effets de plusieurs poses du masque « MC2 » et de plusieurs concentrations de NaCl sur la tête factice

Nous pouvons retenir que, d'un point de vue métrologique, les essais avec une concentration ambiante faible ne sont pas représentatifs des performances réelles du masque. Une étude canadienne [29] a montré ainsi la nécessité d'avoir un nombre de particules relativement élevé ($> \text{à } 40\,000 \text{ p.cm}^{-3}$) lors de l'utilisation du CNC Portacount pour tester des masques à très haute efficacité.

Les variations de fuite, en fonction du débit ventilatoire, déterminées par le photomètre de flamme et le CNC (cf. graphes 3 à 6 en annexe) sont inversées. Ce dernier indique une nette tendance de la dégradation des performances du masque (sauf pour le masque « MC2 ») lorsque le débit ventilatoire augmente. A contrario, les mesures effectuées avec le photomètre de flamme confirment les tendances observées dans la précédente étude [11] (cf. graphe 6 en annexe).

Une explication possible de ce résultat est liée probablement à la différence de méthodes d'analyses des particules (en masse ou en nombre). De nombreuses études sur l'efficacité de filtration mettant en oeuvre ces méthodes analytiques montrent peu de corrélations entre ces deux principes de mesure. Il est ainsi difficile de trancher quant à la fiabilité des résultats lors de tels essais. Le photomètre semble donner un poids plus important aux particules de grand diamètre ($> 1\mu\text{m}$) par rapport au Compteur à Noyau de Condensation. Les particules se comportent différemment à l'interface masque - peau du sujet (cf. figure 3). Le CNC, plus sensible aux fines particules [30] présentes dans l'agent d'essai, est ainsi plus propice à détecter une fuite faciale pour les débits ventilatoires élevés. Seule une analyse plus fine par classe granulométrique permettrait de corroborer l'hypothèse avancée ci-dessus.

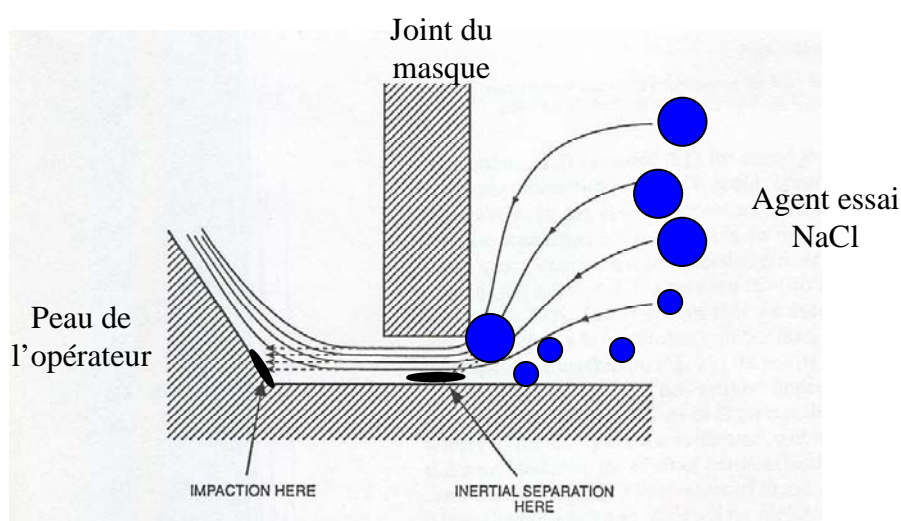


Figure 3. Impaction prépondérante pour les particules de diamètre important

3.2.3 - Essais avec les demi-masques

Nous ne présentons aucun résultat car la tête factice n'est pas adaptée aux tests de performance de ces masques. Les biais de mesure dus à la pose se révèlent trop importants pour que l'influence des débits ventilatoires puisse être étudiée correctement avec ce type de masque.

Néanmoins, le CNC s'est avéré très adapté à la détection de fuites lors de ces essais . Le simple pincement manuel, par exemple de l'élastomère du masque au niveau du nez de la tête factice, conduit à une nette amélioration de l'étanchéité. Sur une tête humaine, cette adaptation est plus facile à corriger avec la texture de la peau humaine. Elle permet ainsi de limiter les fuites à cet endroit et d'obtenir des résultats conformes aux exigences de la norme.

3.3 - Essais de terrain avec le dispositif CNC- Portacount

Des essais de terrain ont pu être menés sur des postes de ponçage de fuselage d'avion avec l'instrument de mesures Portacount. Un double prélèvement permet de calculer le facteur d'ajustement (FF pour Fit Factor en anglais) à partir de la concentration moyenne ambiante et celle dans le masque en procédant à des simulations de travail qui peuvent être variables suivant les normes d'essais. Pour nos essais expérimentaux, nous avons retenu, pour les mesures en ambiance neutre (hors du poste de travail), les exercices ci-après qui sont proches des exercices de la norme européenne mais sans le tapis de marche à 6 km.h^{-1} qui permet de simuler une activité importante de travail :

- respiration normale pendant une minute
- respiration profonde (1 minute)
- déplacement de la tête droite-gauche (1 minute)
- déplacement de la tête haut-bas (1 minute)
- grimaces (15 secondes)
- récitation de l'alphabet (1 minute)
- respiration normale (1 minute).

Puis, après ces exercices, l'opérateur, exposé aux particules de ponçage, était équipé de l'instrument de mesure Portacount. A l'aide d'une transmission sans fil à un PC portable (dispositif Bluetooth), nous avons pu alors piloter à distance les acquisitions et récupérer les données suivant divers prélèvements temporaux. Une des contraintes de l'appareil est d'imposer les mesures sur des opérateurs non-fumeurs et dans une ambiance relativement chargée en fines particules. Ces contraintes ont pu globalement être respectées sauf dans les zones de l'atelier les mieux ventilées. La concentration en fines particules descendait alors en dessous des $1\ 500\text{ particules.cm}^{-3}$ nécessaires à une bonne précision d'analyse.

Les tableaux 9, 10 et 11 indiquent les valeurs de fuites d'ajustement (FF) par masque avec trois opérateurs différents. La dernière colonne de chaque tableau indique le repérage temporel des mouvements de l'opérateur suivant les acquisitions du compteur de particules avec une précision de l'ordre de la minute. Les observations repérées ne sont données, ici, qu'à titre indicatif compte tenu de la faible précision découlant de cette double base temporelle (celle du PC enregistrant les valeurs du Portacount et celle du repérage avec une montre).

Quelques masques testés sont similaires à ceux choisis au cours de l'étude de laboratoire, comme les masques MC1 et MC7.

| Type de masque | Opérateur et lieu | Type essai | Camb (p.cm ⁻³) | FF | temps (s) | mouvements opératoires |
|---|--|----------------------|----------------------------|-------|-----------------------|----------------------------|
| Masque complet type MC1 Taille médium avec filtre à particules P100 | Opérateur 1 Dans le hall de fabrication (hors du poste) | Respiration normale | 1940 | 3900 | 80 | * valeurs non fiables |
| | | Respiration profonde | | 6870 | 160 | |
| | | Tête droite-gauche | | 10500 | 240 | |
| | | Tête haut-bas | | 8360 | 320 | |
| | | Grimace | | 4100 | 355 | |
| | | Alphabet | | 511* | 435 | |
| | Respiration normale | 262* | 495 | | | |
| | Opérateur 1 Poste de travail 1 ^{ère} série de 90s chacune | acqu1 Ponçage | 9010 | 3470 | 90 | Discussion |
| | | acqu2 Ponçage | | 11800 | 180 | Ponçage bras en l'air |
| | | acqu3 Ponçage | | 5620 | 270 | |
| | | acqu4 Ponçage | | 40500 | 360 | |
| | | acqu5 Ponçage | | 30900 | 450 | |
| acqu6 Ponçage | | 28400 | | 540 | Ponçage bras en l'air | |
| acqu7 Ponçage | | 23400 | | 630 | | |
| acqu8 Ponçage | | 23800 | | 720 | | |
| acqu9 Ponçage | | 8060 | | 810 | | |
| acqu10 Ponçage | | 26800 | | 900 | | |
| acqu11 Ponçage | | 15400 | | 990 | | |
| acqu12 Ponçage | | 21700 | | 1080 | | |
| Même masque et même pose | Opérateur 1 Poste de travail 2 ^{ème} série de 90s chacune | acqu1 Ponçage | 6730 | 15600 | | 90 |
| | | acqu2 Ponçage | | 3710 | 180 | |
| | | acqu3 Ponçage | | 16400 | 270 | |
| | | acqu4 Ponçage | | 8980 | 360 | A genoux, tête vers le bas |
| | | acqu5 Ponçage | | 12000 | 450 | |
| | | acqu6 Ponçage | | 3000 | 540 | |
| | | acqu7 Ponçage | | 17200 | 630 | |
| | | acqu8 Ponçage | | 19500 | 720 | Nettoyage |
| | | acqu9 Ponçage | | 5980 | 810 | |
| | | acqu10 Ponçage | | 31600 | 900 | Ponçage bras en l'air |
| | | acqu11 Ponçage | | 7640 | 990 | |
| | | acqu12 Ponçage | | 7800 | 1080 | |

Tableau 9. Masques « type MC1 » avec un filtre à particules P100

| Type de masque | Opérateur et lieu | Type essai | Camb (p.cm ⁻³) | FF | Temps (s) | Mouvements opératoires |
|--|---|--|----------------------------|---|--|--|
| Masque type MC7 et même pose | Opérateur 2 Dans le bureau | Respiration normale Respiration profonde Tête droite-gauche Tête haut-bas Grimace Alphabet Respiration normale | 4610 | 35900 24400 17200 11300 5370 3600 40600 | 60 120 180 240 275 335 395 | |
| Même masque et même pose | Opérateur 2 Au ponçage 1 ^{ère} série acquisition | acqu1 Ponçage acqu2 Ponçage acqu3 Ponçage acqu4 Ponçage acqu5 Ponçage | 3590 | 16700 11100 15400 10300 10300 | 60 120 180 240 300 | Debout bras en l'air Bras au-dessus tête |
| Même masque et même pose | Opérateur 2 2 ^{ème} série acquisition de 60s chacune | acqu1 Ponçage acqu2 Ponçage acqu3 Ponçage acqu4 Ponçage acqu5 Ponçage | 4800 | 17900 8520 21600 15300 11700 | 360 420 480 540 600 | Bras au-dessus tête Bras au-dessus tête Bras au-dessus tête |
| Même masque et même pose | Opérateur 2 3 ^{ème} série acquisition de 60s chacune | acqu1 Ponçage acqu2 Ponçage acqu3 Ponçage acqu4 Ponçage acqu5 Ponçage | 4550 | 10400 10700 19400 12200 11000 | 660 720 780 840 900 | Bras au-dessus tête Courbé, tête sur le côté Ponçage devant les yeux |

Tableau 10. Masques « type MC7 » avec deux filtres à particules P3

| Type de masque | Opérateur et lieu | Type essai | Camb | FF | Temps (sec) | Gestes |
|--|--|--|------|---|--|------------------------|
| Masque type MC7 Taille médium et 2 filtres P3 | Opérateur 3 Local sas accès | Respiration normale Respiration profonde Tête droite-gauche Tête haut-bas Grimace Alphabet Respiration normale | 4700 | 19900 27500 20800 21200 4410 8600 20900 | 60 120 180 240 275 335 395 | Voir exercices du test |
| Même masque et filtres A2P3 | Opérateur 3 Local sas accès | Respiration normale Respiration profonde Tête droite-gauche Tête haut-bas Grimace Alphabet Respiration normale | 5070 | 10100 7360 15600 8870 2290 4040 10500 | 60 120 180 240 275 335 395 | Voir exercices du test |
| Même masque Essais avec 2 filtres P3 et cagoule anti-humidité | Opérateur 3 Local sas accès | Respiration normale | 3940 | 310 | 60 | Un seul exercice |

Tableau 11. Masques « type MC7 » avec divers filtres sur le masque

Remarque : Les valeurs obtenues durant ces essais ne montrent pas de dégradations fortes de l'efficacité des masques. Les valeurs de fuites trouvées, relativement faibles, sont en parfaite concordance avec les valeurs normatives pour ces masques complets à haute efficacité.

4. CONCLUSION

Cette étude montre, une nouvelle fois, la difficulté de dégager des tendances fortes lors d'essais avec une méthode de tests de masques sans sujet d'essai. Tous les masques ne sont pas adaptables à une tête factice comme nous l'avons montré avec tous les demi-masques et deux masques complets testés durant cette étude. Par ailleurs, même lorsque les masques complets sont bien adaptés à la tête, les résultats sont trop discordants entre les méthodes d'analyse. Néanmoins, les valeurs obtenues dans la configuration avec le CNC indiquent que les protocoles d'essais doivent être plus contraignants (tests avec des débits ventilatoires plus élevés pour les sujets d'essais). Ces propositions sont d'actualité dans les groupes de travail ISO, de même que d'autres orientations comme la représentativité des agents d'essais, le panel des sujets d'essais, etc.. Une autre approche serait de valider un appareillage de terrain qui mesurerait plus précisément les performances de masques en situation réelle de travail [31-32]. Le CNC-Portacount offre une possibilité d'avancer dans ce sens sans que pour l'instant nous ayons une parfaite garantie de résultats avec ce type d'appareil. Les essais sommaires, réalisés sur des opérateurs en situation réelle de travail, n'ont pas montré d'anomalies flagrantes lorsque les masques à haute efficacité étaient auparavant bien ajustés sur la tête du sujet. De plus, cet instrument a pu, par exemple, détecter rapidement des performances insuffisantes lorsque le masque porté présentait un manque d'entretien important (traces de peinture) ou qu'il était porté sur une cagoule faciale en tissu. Cet aspect sera plus largement abordé au cours de la nouvelle étude « Validation des méthodes de terrain pour évaluer l'étanchéité d'ajustage des masques respiratoires ».

Dans la perspective d'évolution des normes avec prise en compte de débits supérieurs ou de l'exposition à des aérosols de type bio-contaminants, il nous apparaît nécessaire de développer des moyens de mesures avec une machine à respirer et une tête factice qui soient les plus représentatifs d'une situation de respiration humaine. Des études complémentaires avec un matériel métrologique adapté (par taille de particules type SMPS) devront probablement être développées dans un avenir proche.

Par ailleurs, le groupe de travail ISO TC94/SC15/WG1/PG6 (classification des appareils de protection respiratoire) étudie la mise en place de valeurs plus strictes de fuite totale vers l'intérieur avec, pour conséquence directe, de proposer de nouvelles classes d'appareils (haut niveau à 0,01 %, soit cinq fois meilleure que la valeur actuelle pour un masque complet), mais également d'en supprimer. Les exercices de simulation de travail devraient, eux-aussi, prendre en compte de nouveaux rythmes de travail (jusqu'à 150 L.min⁻¹ pendant de courts instants). Des agents d'essais avec une granulométrie plus faible sont aussi à l'étude dans ces groupes de travail pour simuler des environnements de type particules ultra-fines par exemple. Les laboratoires de certification devront donc faire évoluer leur potentiel métrologique pour réaliser ces essais plus contraignants.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

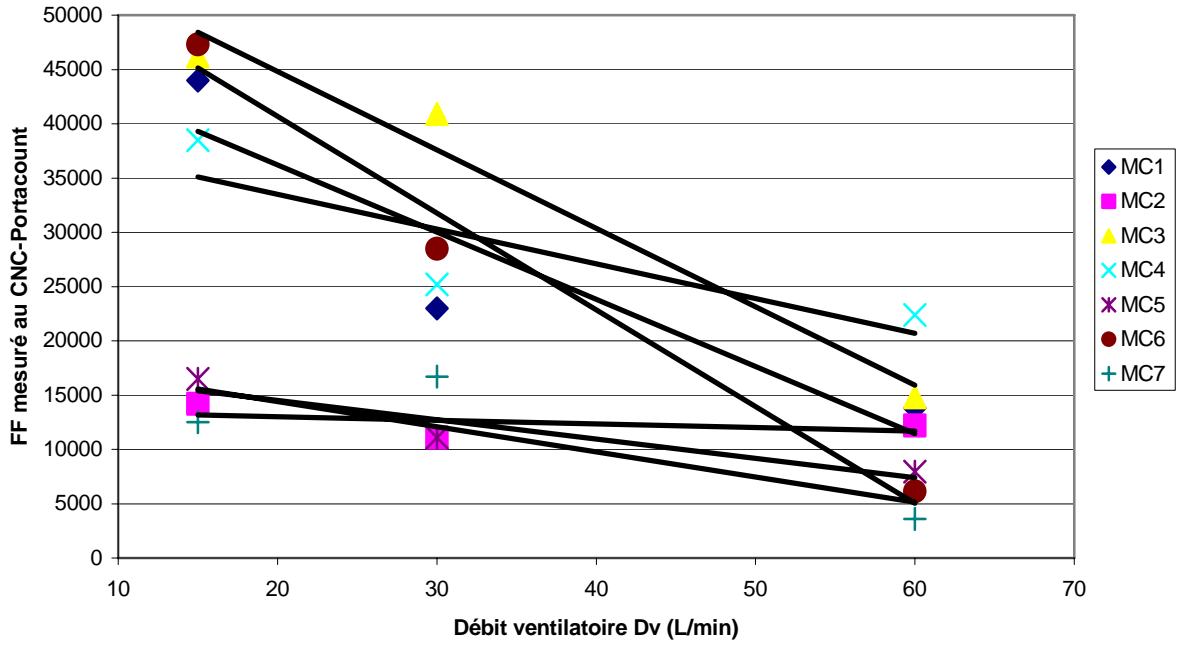
- [1] HERY M, MEYER J.P., VILLA M., HUBERT G. , WROBEL. R. - Efficacité de demi-masques anti-poussières non ventilés en situation industrielle. Cahiers de Notes Documentaires INRS n° 154, 2^{ème} trim. 1994, pp. 147-155.
- [2] MEYER J.P., HERY M., HUBERT G., FRANCOIS D., HECHT G., VILLA M. - Demi-masques à pression négative, influence des conditions de travail sur leur confort et leur efficacité. Cahiers de Notes Documentaires INRS n° 171, 1^{er} trim. 1998, pp. 21-33.
- [3] POIROT P., GRZEBIK M. HERY M., POSSOZ C., SUBRA I. - Efficacité de masques anti-gaz à ventilation libre en situation industrielle. Cahiers de Notes Documentaires INRS n° 178, 1^{er} trim. 2000, pp. 43-51.
- [4] LIU Y., STOWE M. H. - Respiratory Protection from Isocyanate Exposure in the Autobody Repair and Refinishing Industry. J. Occup. Environ. Hyg., 2006, 3(5): 234-249.
- [5] VAUGHAN N., RAJAN-SITHAMPARANADARAJAH B. - Meaningful Workplace Protection Factor Measurement: Experimental Protocols and Data Treatment. Ann. Occup. Hyg., 2005, 49(7): 549-561.
- [6] NICAS, M. NEUHAUS J. - Variability in Respiratory Protection and the Assigned Protection Factor. J. Occup. Environ. Hyg., 2004, 1: 99-109.
- [7] ZHUANG Z., COFFEY C. C., JENSEN P. A., CAMPBELL D. L., LAWRENCE R. B., MYERS W. R. - Correlation between quantitative fit factors and workplace protection factors measured in actual workplace environments at a steel foundry. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 2003, 64(6): 730-738.
- [8] WEBER R.A., MULLINS H.E. - Measuring Performance of a half-mask Respirator in a styrene Environment. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 2000, 61(6): pp. 415-421.
- [9] NELSON, T. J., JAYJOCK M. A. - How Protective Are Respirator Assigned Protection Factors: An Uncertainty Analysis. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 2000, 61(3): 388 - 393.

- [10] MYERS, W. R., ZHUANG Z. - Field Performance Measurements of Half-Facepiece Respirators: Steel Mill Operations. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1998, 59(11): 789-795.
- [11] MARTIN P., ROUSSEAU R., BRAND F. - Détermination des performances des masques anti-poussières à média filtrant classique. *Cahiers de Notes Documentaires INRS n° 197, 4^{ème} trim. 2004*, pp. 21-29.
- [12] NORME EN 13274-1 (2001) - Appareils de protection respiratoires - Méthodes d'essai. Partie 1 : Détermination de la fuite vers l'intérieur et de la fuite totale vers l'intérieur.
- [13] MEYER J.P., HORWAT F. - Débit ventilatoire de travail. Document pour le Médecin du Travail INRS n° 76, 4^{ème} trim. 1998, pp. 343 –350.
- [14] KAUFMAN, J. W., HASTINGS S. - Respiratory Demand During Rigorous Physical Work in a chemical Protective Ensemble. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2005, 2: 98-110.
- [15] SINKULE-E, TURNER-N - Metabolic and Respiratory Responses During the Performance of a One-Hour Man Test 4. *J Int Soc Respir Prot*, 2002, 19(1-2): 49-57.
- [16] BERNDTSSON, G., EKMAN L. - A New Simplified Technique for Measuring Inspiratory Flow Characteristics. *J. Int. Soc. Respir. Prot.*, 2003, 20: 91-101.
- [17] BERNDTSSON, G. - Peak Inhalation Air Flow and Minute Volumes Measured in a Bicycle Ergometer Test." *J. Int. Soc. Respir. Prot.*, 2004, 21(1-2): 21-29.
- [18] EN 136 (Mars 1998) : Appareils de protection respiratoire Masques complets Exigences, essais, marquage.
- [19] EN 140 (Décembre 1998) : Appareils de protection respiratoire Demi-masques et quarts de masques. Exigences, essais, marquage.
- [20] TSI, Inc.: PortaCount Plus Model 8020, Operation and Service Manual. TSI Inc, St. Paul, MN (2004).
- [21] ZHUANG Z., COFFEY C. C., LAWRENCE-RB - The effect of ambient aerosol concentration and exercise on Portacount quantitative fit factors. *J. Int. Soc. Respir. Prot.*, 2004, 21(Spring/Summer): 11-20.
- [22] CRUTCHFIELD, C. D., FAIRBANK E. O. - Effect of Test Exercises and Mask Donning on Measured Respirator Fit. *Appl. Occup. Env. Hyg.*, 1999, 14(12): 827-837.
- [23] MYERS. W.R., ALLENDER. J., PLUMMER. R., STOBBE. T. - Parameters That Bias the Measurement of Airborne Concentration Within a Respirator. *Am. Ind. Hyg.Assoc. J.*, 1986, 47(2): 106-114.
- [24] DA ROZA, R. A., BIERMANN A. H. - Evaluation of Portacount for determining respirator fit factors, Part III: human subject tests and comparison with an aerosol photometer. *J. Int. Soc. Respir. Prot. Prot*, 1991, 9: 22-37.
- [25] GARDNER P. D., HOFACRE K. C., RICHARDSON A. W. - Comparison of Simulated Respirator Fit Factors Using Aerosol and Vapor Challenges. *J. Occup . Environ. Hyg.*, 2004, 1: 29-38.

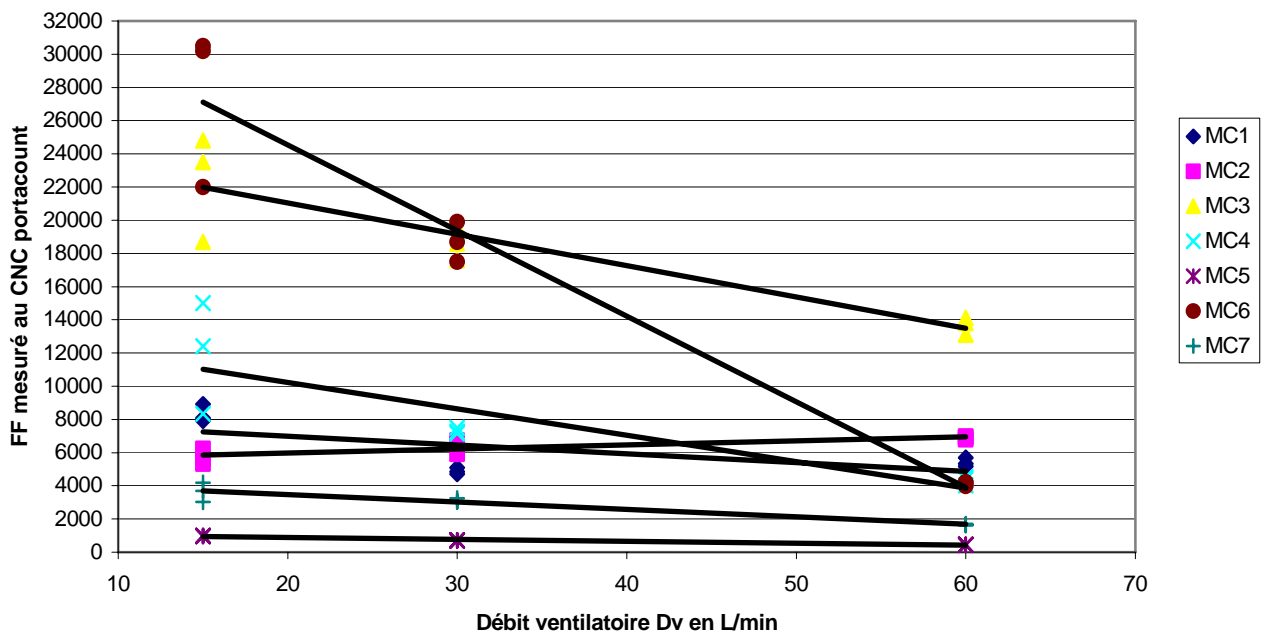
- [26] COFFEY C. C., LAWRENCE R. B., ZHUANG Z., DULING M., CAMPBELL D. L. - Errors Associated with Three Methods of Assessing Respirator Fit. *J. Occup . Environ. Hyg.*, 2006, 3(1): 44 - 52.
- [27] HAN D. H., LEE J. - Evaluation of Particulate Filtering Respirators Using Inward Leakage (IL) or Total Inward Leakage (TIL) Testing-Korean Experience. *Ann. Occup. Hyg.*, 2005, 49(7): 569-574.
- [28] CAMPBELL D. L., COFFEY C. C., JENSEN P. A. and ZHUANG, Z. - Reducing respirator fit test errors: a multi-donning approach. *J. Occup . Environ. Hyg.*, 2005, 2(8): 391-399.
- [29] HARRISON B. H., LIANG S. H. - Quantitative Fit Testing of Military Gas Masks with the TSI Portacount: Part II - Quantifying the Limitations and Recommendations for Use. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 2005, vol. 22.
- [30] BIERMANN A.H., BERGMAN W. - Filter penetration measurement using a condensation nucleu counter and an aerosol photometer. *Journal of Aerosol Science*, 1998, n°4, vol. 19, pp. 471-483.
- [31] GROVES, W., REYNOLDS S. J. - Prototype Sampling System for Measuring Workplace Protection Factors for Gases and Vapors. *Appl. Occup. Env. Hyg.*, 2003, 18(5): 394-402.
- [32] LEE, S.A., GRINSHPU S. A. - Laboratory and Field Evaluation of a New Personal Sampling System for Assessing the Protection Provided by the N95 Filtering Facepiece Respirators against Particles. *Ann. Occup. Hyg.*, 2005, 49(3): 245-257.

- ANNEXE -

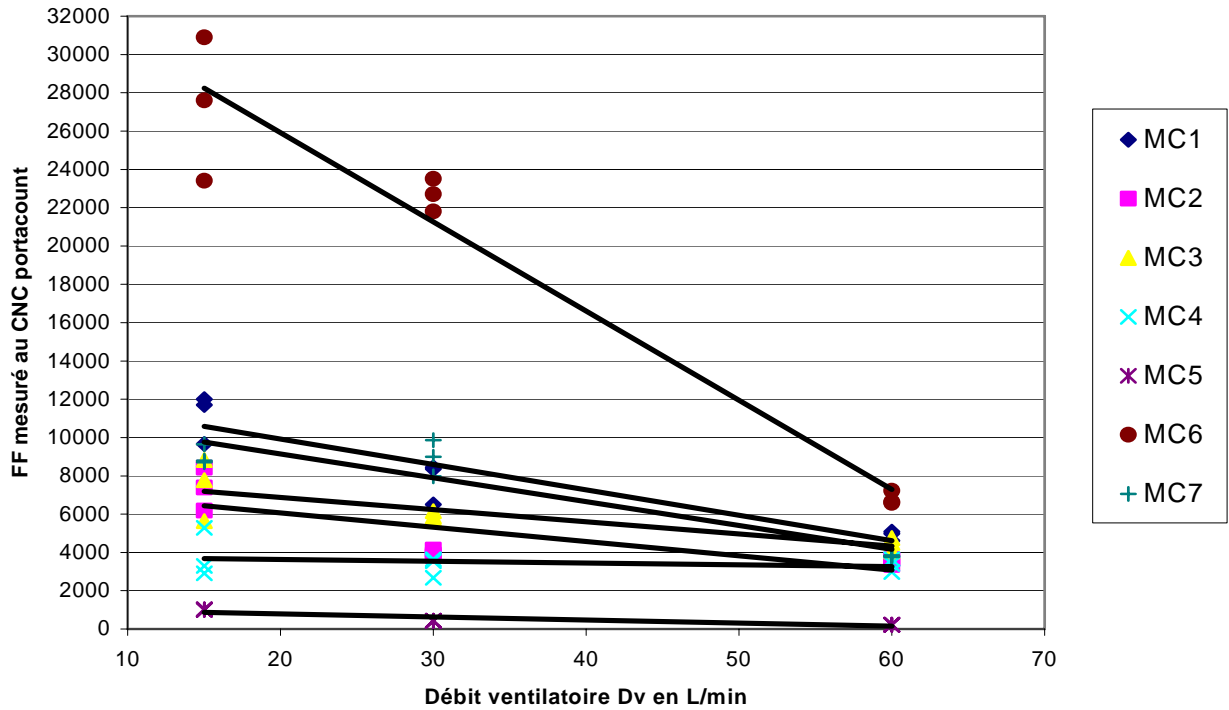
Grappe 3 : Comparaison entre masques du FF- Portacount en ambiance neutre (sans sel)



Grappe 4 : Comparaison entre les masques complets du FF mesuré au CNC - Portacount avec NaCl 0,4%



**Graphe 5 : Comparaison entre les masques complets
du FF mesuré au CNC - Portacount
avec NaCl 2%**



**Graphe 6 : Comparaison entre les masques complets
du FF mesuré au PF Moores**

