



Évaluation de l'efficacité des moyens de protection collective et des équipements de protection individuelle vis-à-vis de l'exposition des travailleurs aux fibres courtes et fibres fines d'amiante

Novembre 2011

Édition scientifique



Évaluation de l'efficacité des moyens de protection collective et des équipements de protection individuelle vis-à-vis de l'exposition des travailleurs aux fibres courtes et fibres fines d'amiante

Novembre 2011

Édition scientifique

Évaluation de l'efficacité des moyens de protection collective et des équipements de protection individuelle vis-à-vis de l'exposition des travailleurs aux fibres courtes et fibres fines d'amiante

Saisine n°2009-SA-0336 « moyens de protection collective et individuelle amiante »

RAPPORT
présentant un état des lieux sur les connaissances et obligations relatives aux équipements de protection collective et individuelle amiante

Novembre 2011

Mots clés

Amiante, fibres fines, fibres courtes, moyens de protection collective, équipement de protection individuelle, appareil de protection respiratoire, EPI, APR, FFA, FCA

Présentation des intervenants

RAPPORTEURS

M. Patrick BROCHARD – PU-PH en médecine du travail au CHU de Bordeaux, directeur du laboratoire Santé Travail Environnement (LSTE, EA 3672) – coordonnateur du programme Evalutil – Expert du CES « évaluation des risques liés aux milieux aériens ».

M. Jacques CORBIERE – Chef du BIREN (bureau d'évaluation des instruments de radioprotection et des équipements nucléaires) à l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) – responsable de l'activité de certification CE des EPI dans le domaine de la radioprotection – membre de la commission de normalisation relative aux appareils de protection respiratoire.

Mme Michèle GUIMON – Chef du pôle Risques Chimiques, département Expertise et conseil technique à l'INRS (Institut national de recherche et de sécurité) – membre de la commission de normalisation relative aux appareils de protection respiratoire.

M. Horacio HERRERA – Chef du service d'hygiène du travail à l'Institut universitaire romand de santé au travail – hygiéniste du travail – Expert du CES « évaluation des risques liés aux milieux aériens ».

PARTICIPATION ANSES

Contribution scientifique

Mme Amandine PAILLAT – Chef de projet scientifique – Direction de l'Evaluation des Risques

Relecteurs

Mme Dominique BRUNET – Chef d'unité Expologie Professionnelle – Direction de l'Evaluation des Risques

Mme Maylis TELLE-LAMBERTON – Directrice adjointe Direction de l'Evaluation des Risques

Secrétariat administratif

Mme Véronique QUESNEL – Assistante

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Abréviations	8
Liste des tableaux.....	9
Liste des figures	9
1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine.....	10
1.1 Contexte.....	10
1.2 Objet de la saisine.....	10
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	12
Partie A : Exigences réglementaires, normatives et recensement des EPC-EPI amiante	13
2 Exigences réglementaires en matière de protection collective et individuelle contre l'amiante	14
2.1 Réglementation en matière de protection collective amiante	15
2.2 Réglementation en matière d'équipements de protection individuelle amiante	16
2.2.1 Contexte général réglementaire	16
2.2.1.1 Classification	16
2.2.1.2 Certification/ marquage CE	17
2.2.1.3 Obligations du fabricant.....	17
2.2.1.4 Obligations de l'employeur	17
2.2.2 Rappel réglementaire relatif à la protection individuelle contre l'amiante	18
2.2.2.1 Rappel réglementaire des exigences relatives à la protection respiratoire contre l'amiante	18
2.2.2.2 Rappel réglementaire des exigences relatives aux vêtements de protection contre l'amiante	18
2.2.2.3 Travailleurs indépendants	18
2.3 Récapitulatif des exigences réglementaires relatives aux équipements de protection contre l'amiante	19
3 Normes d'exigences pour les équipements de protection collective contre l'amiante.....	20
3.1 Les filtres à haute efficacité, à très haute efficacité, à très faible pénétration.....	20
3.1.1 Classification, exigences.....	20
3.1.2 Performance de filtration.....	21
3.1.2.1 1 ^{ère} étape : essais de médium filtrant plan.....	22
3.1.2.2 2 ^{ème} étape : essai d'étanchéité de l'élément filtrant	22
3.1.2.3 3 ^{ème} étape : essai d'efficacité de l'élément filtrant	23
3.1.2.4 Caractéristiques de l'aérosol d'essai et méthode de comptage	23
3.1.3 Norme NF X 44-013 et classification des filtres.....	24
3.2 Conclusion sur les normes d'exigences relatives aux équipements de protection collective contre l'amiante.....	25
4 Aspirateurs à usage industriel	26
4.1 Classification.....	26

4.2 Exigences	26
4.2.1 Degré de pénétration	26
4.2.2 Résistance à l'éclatement	27
4.3 Essais.....	27
4.3.1 Essais de l'élément du filtre principal.....	27
4.3.2 Essai de l'appareil assemblé	27
4.3.3 Essai de résistance à l'éclatement	28
4.4 Conclusion.....	28
 5 Normes d'exigences pour la protection individuelle contre l'amiante	 29
5.1 Protection respiratoire	29
5.1.1 Classification générale	29
5.1.2 Normes harmonisées d'exigence APR Amiante	30
5.1.3 Exigences de performances requises pour les appareils de protection respiratoire contre l'amiante	31
5.1.3.1 Pénétration du filtre	33
5.1.3.2 Fuite vers l'intérieur et fuite totale vers l'intérieur	35
5.1.3.3 Résistance respiratoire.....	39
5.1.3.4 Résistance au colmatage	40
5.1.3.5 Résistance mécanique	41
5.1.3.6 Étanchéité	41
5.1.3.7 Essai pratique de performance.....	42
5.2 Vêtements de protection.....	42
5.2.1 Rappel sur les types de vêtements de protection.....	42
5.2.2 Exigences de performance requises pour les vêtements de protection contre l'amiante	43
5.2.2.1 Généralités	43
5.2.2.2 Fuite vers l'intérieur	44
5.3 Conclusion.....	46
 6 Recensement des EPC et EPI en fonction des activités.....	 47
 Partie B : Synthèse bibliographique	 52
 7 Objectifs de la synthèse bibliographique	 53
 8 Rappels théoriques sur la filtration de l'air	 54
 9 Efficacité des équipements de protection collective contre l'amiante	 57
9.1 Confinement	57
9.2 Filtres à très haute efficacité	57
9.3 Conclusion.....	57
 10 Aspirateurs à usage industriel	 58
 11 Efficacité des équipements de protection individuelle.....	 59
11.1 Protection respiratoire	59
11.1.1 Estimation de l'efficacité : établissement de « facteurs de protection ».....	59
11.1.1.1 Existence de différents facteurs de protection.....	59

11.1.1.2	Utilisation des facteurs de protection.....	62
11.1.1.3	Perspectives.....	63
11.1.2	Composantes de l'efficacité des APR	64
11.1.2.1	Pénétration du filtre	64
11.1.2.2	Fuite vers l'intérieur	64
11.1.2.3	Fuite totale vers l'intérieur	65
11.1.3	Facteurs d'influence sur l'efficacité de filtration.....	66
11.1.3.1	Déterminants de l'efficacité de la filtration des aérosols.....	66
11.1.3.1.1	<i>Caractéristiques de l'aérosol</i>	67
11.1.3.1.2	<i>Caractéristiques du filtre</i>	68
11.1.3.1.3	<i>Conditions d'essai des APR</i>	69
11.1.3.1.4	<i>Méthode de mesure</i>	69
11.1.4	Facteurs d'influence sur la fuite vers l'intérieur	70
11.1.5	Facteurs d'influence sur la fuite totale vers l'intérieur	73
11.1.6	Évaluation de l'efficacité vis-à-vis de l'amiante	74
11.1.7	Conclusion.....	77
11.2	Vêtements de protection.....	78
11.2.1	Synthèse bibliographique	78
11.2.2	Conclusion.....	80
12	Comparaison de la filtration des fibres d'amiante ou autres particules non sphériques et des aérosols utilisés pour les essais normalisés (MPPS).....	81
12.1	Comparaison de la filtration des fibres / aérosols utilisés pour les essais normalisés	81
12.1.1	Synthèse bibliographique	81
12.1.1.1	Etudes expérimentales.....	81
12.1.1.2	Etudes de modélisation	84
12.1.2	Discussion - Conclusion	85
12.2	Comparaison bactéries / aérosols utilisés pour les essais normalisés	85
12.2.1	Synthèse bibliographique	85
12.2.2	Discussion - Conclusion	86
12.3	Comparaison Nanoparticules / aérosols utilisés pour les essais normalisés	86
12.3.1	Synthèse bibliographique	86
12.3.2	Discussion - Conclusion	87
12.4	Conclusions.....	87
13	Conclusions sur la synthèse bibliographique.....	89
14	Perspectives	91
15	Bibliographie.....	93
15.1	Publications.....	93
15.2	Normes.....	99
15.3	Législation et réglementation.....	101
ANNEXES		102
Annexe 1 : Lettre de saisine.....		103

Annexe 2 : Suivi des mises à jour du rapport	106
Annexe 3 : Synthèse des déclarations publiques d'intérêts des experts par rapport au champ de la saisine	107
Annexe 4 : Exigences relatives à la résistance respiratoire	109

Abréviations

AIHA : American Industrial Hygiene Association

APF : Assigned protection factor (soit en français, facteur de protection assigné)

APR : Appareil de protection respiratoire

CEN : Comité Européen de Normalisation

DEHS : di-(2-ethylhexyl) sebacate

EPC : Equipement de protection collective

EPI : Equipement de protection individuelle

FCA : Fibres courtes d'amiante

FFA : Fibres fines d'amiante

FPA : Facteur de protection assigné

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité

MEB : Microscopie Electronique à Balayage

META : Microscopie Electronique à Transmission Analytique

MOCP : Microscopie Optique à Contraste de Phase

MPC : Moyens de protection collective

NIOSH : National Institute for Occupational Safety and Health

OSHA : Occupational Safety and Health Administration

PAO : Poly Alpha Olefin

PEROSH : Partnership for European Research in Occupational Safety and Health

SWP : Simulated workplace protection factor – facteur de protection en situation de travail simulée

WPF : Workplace protection factor – facteur de protection en situation de travail

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des exigences réglementaires relatives aux équipements de protection collective et individuelle contre l'amiante	19
Tableau 2 : Classification et exigences de performance des filtres à haute efficacité, très haute efficacité et très faible pénétration	21
Tableau 3 : Classification des filtres à air à très haute efficacité selon la recommandation eurovent 4/4 (Darbord, 2003)	24
Tableau 4 : Principales exigences au regard de l'efficacité de protection applicables aux APR amiante	32
Tableau 5 : Exigences relatives à la pénétration des filtres (en gras filtres utilisables pour se protéger de l'amiante)	34
Tableau 6 : Méthodes d'essai de fuite vers l'intérieur	35
Tableau 7 : Exigences relatives à la fuite vers l'intérieur et la fuite totale vers l'intérieur des APR (en gras sont précisées les exigences applicables pour les APR visant à protéger de l'amiante)	38
Tableau 8 : Normes harmonisées définissant 6 types de vêtements de protection	43
Tableau 9 : Recensement des APR amiante (les modèles de type FFP3 ne sont pas recensés du fait du trop grand nombre de fournisseurs et de modèles existants)	50
Tableau 10 : Facteurs de protection nominaux et assignés (issus NF EN 529, OSHA 2006, NIOSH 2004, INRS 2010b)	61
Tableau 11 : Effets de divers paramètres sur les performances des filtres (issu de Brown, 2001)	68
Tableau 12 : Caractéristiques des aérosols générés dans l'étude de Cheng (Cheng <i>et al.</i> 2006)	81
Tableau 13 : Synthèse des résultats obtenus par Cheng (Cheng, 2006)	82
Tableau 14 : exigences de résistance respiratoire pour les filtres à particules (EN 143)	109
Tableau 15 : exigences de résistance respiratoire pour les pièces faciales (EN 136, EN 140, EN 149+A1)	110
Tableau 16 : exigences de résistance respiratoire pour les APR à ventilation assistée avec cagoule (NF EN 12941)	111
Tableau 17 : exigences de résistance respiratoire pour les APR à ventilation assistée avec masque complet (EN 12942)	111
Tableau 18 : exigences de résistance respiratoire pour APR isolant à adduction d'air comprimé à débit continu (EN 14594)	111
Tableau 19 : exigences de résistance respiratoire pour APR isolant à adduction d'air comprimé à débit continu (EN 14594)	111

Liste des figures

Figure 1 : Types d'appareils de protection respiratoire	30
Figure 2 : Schéma du principe de mesure de la pénétration du filtre	34
Figure 3 : Schéma du principe de mesure de la fuite vers l'intérieur (d'après NF EN 136)	37
Figure 4 : Positionnement des sondes d'échantillonnage sur le corps du sujet (norme NF EN ISO 13982-2)	45
Figure 5 : Mécanismes de filtration d'une particule par un filtre à fibre	55
Figure 6 : Évolution de l'efficacité de filtration théorique en fonction du diamètre des particules	55
Figure 7 : Facteurs influençant les résultats des essais sur les filtres des APR (Eninger <i>et al.</i> 2008b)	66
Figure 8 : Répartition granulométrique de l'aérosol de chlorure de sodium selon EN 143 (issu NF EN 143)	70

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

L'Afsset a publié en février 2009 un rapport d'expertise collective et émis un avis relatif à la prise en compte du critère dimensionnel pour la caractérisation des risques sanitaires liés à l'amiante, et notamment relatif aux fibres courtes d'amiante (FCA) et fibres fines d'amiante (FFA) (Afsset, 2009).

Concernant l'environnement professionnel, pour évaluer les expositions, les recommandations de ce rapport indiquent principalement la nécessité de prendre en compte les FFA dont la cancérogénicité a été confirmée dans l'étude et pour cela de remplacer la méthode de comptage des fibres par microscopie optique à contraste de phase (MOCP) par la microscopie électronique à transmission analytique (META).

L'Afsset, dans son avis, a également recommandé une réévaluation des équipements de protection collective et individuelle afin d'apprécier leur efficacité vis-à-vis des FFA et des FCA.

L'Afsset, ayant également été chargée de réévaluer la pertinence des valeurs limites d'exposition professionnelles à l'amiante en vigueur, a publié en août 2009 un rapport d'expertise collective dans lequel les excès de risque de mortalité par mésothéliome ou par cancer du poumon rapporté à la population des travailleurs français ont été estimés (Afsset, 2009b).

1.2 Objet de la saisine

Suite aux recommandations émises par l'Afsset dans son expertise collective relative aux FCA et FFA, le ministère du travail a saisi l'agence afin qu'elle évalue l'efficacité des moyens de protection collective (MPC) et des équipements de protection individuelle (EPI) vis-à-vis de l'exposition des travailleurs aux FCA et FFA.

La lettre de saisine (Cf. annexe 1) comporte des questions pour lesquelles trois types de travaux différents sont à mener :

- Un recensement des moyens de protection collectif et des équipements de protection individuelle existant en milieu professionnel pour la protection des travailleurs vis-à-vis de l'amiante ;
- Une évaluation de leur efficacité vis-à-vis des différentes fibres d'amiante (FFA, FCA) en indiquant leurs éventuelles limites ;
- Une définition des types d'équipement de protection individuelle adaptés en fonction :
 - de la durée des activités et du port de ces équipements
 - des niveaux d'empoussièrement rencontrés
 - des techniques employées
 - de la nature des opérations
 - des nouvelles valeurs limites d'exposition à respecter
 - des facteurs de protection des EPI.

Cette saisine requiert deux types de travaux de nature différente :

- des travaux relevant d'un appui scientifique et technique (partie relative au recensement des moyens de protection collective et des équipements de protection individuelle) ;

- des travaux relevant du domaine de l'évaluation (parties relatives à la vérification de l'efficacité de ces équipements de protection et à l'adaptation des types d'équipement de protection individuelle en fonction de différents critères tels que la durée des activités, les niveaux d'empoussièrement rencontrés...).

Par ailleurs, les essais normalisés permettant d'évaluer les performances des EPI sur le marché (pénétration du filtre, fuite vers l'intérieur, etc....) sont actuellement réalisés avec des aérosols de chlorure de sodium dont la taille est représentative de la taille des particules les plus pénétrantes (dite en anglais MPPS : most penetrating particle size).

Il a donc été jugé indispensable, préalablement à tout lancement de travail d'évaluation, de déterminer si les fibres d'amiante (toutes fibres confondues : FFA, FCA et OMS¹) pouvaient être assimilées à ces aérosols de chlorure de sodium en ce qui concerne leur comportement à la filtration.

D'autre part, la problématique de l'efficacité des EPI vis-à-vis de l'amiante devait être mieux cernée en identifiant les différents facteurs pouvant influencer sur leur efficacité.

C'est pourquoi, le présent rapport présente un état des lieux technique visant à déterminer si les exigences techniques actuelles portant sur ces équipements de protection sont suffisantes vis-à-vis des FCA et FFA ou bien si des investigations plus poussées doivent être menées dans le cadre d'une expertise collective.

Cet état des lieux technique comprend :

- le recensement des exigences réglementaires relatives à la protection contre l'amiante ;
- le recensement des équipements de protection collective et des équipements de protection individuelle ;
- le recensement des normes d'exigences portant sur ces équipements de protection contre l'amiante ;
- une synthèse bibliographique portant sur l'efficacité des équipements de protection (collective et individuelle) vis-à-vis de l'amiante afin d'identifier :
 - les paramètres ayant un rôle prépondérant dans l'efficacité des équipements de protection individuelle visant à protéger de l'amiante (fuite vers l'intérieur, pénétration, etc....) ;
 - les différents facteurs pouvant influencer sur l'efficacité des équipements de protection collective (EPC) et des équipements de protection individuelle (EPI) ;
 - les études réalisées afin d'évaluer spécifiquement l'efficacité des EPI vis-à-vis de l'amiante (essais normatifs et essais de terrain) ;
 - les publications traitant de la pertinence de l'assimilation des fibres d'amiante à des particules MPPS, c'est-à-dire traitant de la comparaison des niveaux d'efficacité de protection déterminée avec des fibres d'amiante par rapport aux niveaux de protection obtenus avec un aérosol de particules MPPS.

¹ FCA : fibre de longueur < 5µm, de diamètre < 3µm et de ratio L/D ≥ 3

FFA = fibre de longueur ≥ 5µm, de diamètre < 0,2 µm et de ratio L/D ≥ 3

OMS : fibre de longueur ≥ 5µm, de diamètre compris entre 0,2 et 3 µm et de ratio L/D ≥ 3 (Afsset, 2009)

L'objectif de cette synthèse bibliographique est de répondre aux questions suivantes :

- L'efficacité des EPC et EPI a-t-elle été évaluée spécifiquement vis-à-vis de l'amiante ? Comment sont réalisées ces évaluations ?
- Les essais normatifs mettant en œuvre un aérosol de particules représentatif des MPPS peuvent-ils être représentatifs du comportement des fibres d'amiante (notamment des FCA et FFA) ?
- L'efficacité dans les conditions réelles d'utilisation peut-elle être déduite de l'efficacité établie par essais normatifs ?

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

Le traitement de cette saisine a été confié à la Direction D'Evaluation des Risques de l'Anses (anciennement département expertises en santé environnement-travail de l'Afsset).

Cet état des lieux technique, qui permet de présenter une revue de la bibliographie relative aux moyens de protection collective et individuelle amiante, a été rédigé par l'Anses et soumis à la relecture de quatre experts intervenant en leur nom propre, reconnus pour leurs compétences dans le domaine. Le présent rapport tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par l'ensemble de ces experts.

Partie A : Exigences réglementaires, normatives et recensement des EPC-EPI amiante

2 Exigences réglementaires en matière de protection collective et individuelle contre l'amiante

Les principes généraux de prévention sont listés à l'article L.4121-2 du Code du Travail. Au nombre de neuf, ils introduisent une priorisation dans les mesures de prévention à mettre en place :

- 1°: Eviter les risques ;
- 2 : Evaluer les risques qui ne peuvent pas être évités ;
- 3 : Combattre les risques à la source ;
- 4 : Adapter le travail à l'homme, en particulier en ce qui concerne la conception des postes de travail ainsi que le choix des équipements de travail et des méthodes de travail et de production, en vue notamment de limiter le travail monotone et le travail cadencé et de réduire les effets de ceux-ci sur la santé ;
- 5 : Tenir compte de l'état d'évolution de la technique ;
- 6 : Remplacer ce qui est dangereux par ce qui n'est pas dangereux ou par ce qui est moins dangereux ;
- 7 : Planifier la prévention en y intégrant, dans un ensemble cohérent, la technique, l'organisation du travail, les conditions de travail, les relations sociales et l'influence des facteurs ambiants, notamment les risques liés au harcèlement moral, tel qu'il est défini à l'article L. 1152-1 ;
- 8 : Prendre des mesures de protection collective en leur donnant la priorité sur les mesures de protection individuelle ;
- 9 : Donner les instructions appropriées aux travailleurs.

De manière systématique, la protection collective doit primer sur la protection individuelle.

Les mesures de protection collective englobent les équipements dédiés à la protection collective, tels que les extracteurs d'air par exemple, ainsi que l'ensemble des mesures organisationnelles visant à réduire les expositions, telles que par exemple le choix des procédés et méthodes de travail, l'aménagement des lieux de travail, des installations ou des postes de travail.

Compte tenu de l'objectif de l'étude qui consiste à vérifier si l'efficacité de protection des équipements de protection (collective et individuelle) utilisés dans le domaine de l'amiante peut être évaluée à l'aide des aérosols de particules de taille MPPS tels qu'utilisés dans les essais de performance normatifs ou bien si la nature fibreuse et de la taille des particules d'amiante implique qu'une évaluation spécifique de l'efficacité de protection de ces équipements soit menée, le rapport ne traite pas de l'efficacité des mesures organisationnelles concourant à la protection collective.

2.1 Réglementation en matière de protection collective amiante

La protection collective est assurée par la mise en œuvre de divers équipements d'aération ou d'assainissement ainsi que par la mise en place de mesures organisationnelles telles que notamment une configuration spécifique du chantier ou l'utilisation de techniques d'enlèvement particulières.

De la même manière, les dispositions réglementaires relatives à la protection des travailleurs exposés à l'amiante (articles R.4412-94 à R.4412-148 du Code du Travail) prévoient des mesures de protection collective :

- le confinement de la zone de travail avec des enveloppes étanches
- la mise en dépression permanente de la zone de travail
- la mise en œuvre de mesures d'aspiration à la source
- l'utilisation d'extracteurs d'air équipés de filtres absolus, de sas 3 ou 5 compartiments permettant de décontaminer le personnel et le matériel, d'aspirateurs équipés de filtres à très haute efficacité.

L'article R.4412-127 du Code du Travail précise que « la protection collective des travailleurs est assurée dans les conditions suivantes :

- la zone de travail est maintenue en dépression par rapport au milieu extérieur par la mise en place d'extracteurs adaptés, équipés de préfiltres et de filtres absolus à très haute efficacité, d'un rendement supérieur à 99,99 % selon la norme NF X 44-013 ;
- un dispositif de mesures vérifie en permanence le niveau de la dépression ;
- un test à l'aide d'un générateur de fumée est effectué avant le début des travaux pour s'assurer de l'étanchéité de la zone ;
- pendant la durée des travaux, il est procédé périodiquement à une pulvérisation de liquides permettant la sédimentation des fibres en suspension dans l'air afin d'abaisser au niveau le plus faible possible la concentration en fibres d'amiante dans l'atmosphère ».

Il est à noter que le Code du Travail introduit une distinction entre les mesures de protection à mettre en place selon la nature des travaux. Ainsi on peut noter une différence entre les opérations de confinement et de retrait d'amiante ou de matériaux friables contenant de l'amiante et les opérations de confinement ou de retrait de matériaux non friables à base d'amiante.

Confinement et de retrait d'amiante ou de matériaux friables contenant de l'amiante

« Toute opération de confinement et de retrait d'amiante ou de matériaux friables contenant de l'amiante est précédée d'une phase de préparation du chantier comprenant, entre autre, la dépollution, par aspiration avec un équipement doté d'un dispositif de filtration absolue, de toutes les surfaces et équipements du local à traiter ;

Le confinement du chantier doit être réalisé par la construction d'une enveloppe étanche au passage de l'air et de l'eau autour des éléments de construction, des structures ou des équipements à traiter, y compris en partie basse, sur le sol » (article R.4412-125 du Code du Travail).

« Un tunnel comportant cinq compartiments (sas) permettant la décontamination des intervenants et des équipements constitue pour les personnes la seule voie d'accès depuis l'extérieur vers la zone de travail.

Lorsque les travailleurs sont équipés de vêtements jetables ou lorsque la mise en place d'un système à cinq compartiments s'avère techniquement impossible, un tunnel à trois compartiments peut être utilisé » (Article R.4412-126 du Code du Travail).

Confinement et de retrait d'amiante ou de matériaux non friables contenant de l'amiante

« Toute opération de confinement ou de retrait de matériaux non friables à base d'amiante est précédée d'une phase de préparation du chantier comprenant :

1° Le confinement du chantier qui, selon l'empoussièrement attendu en fonction des techniques employées, peut aller du confinement exigé pour les opérations de retrait d'amiante ou de matériaux friables contenant de l'amiante, jusqu'à un confinement plus limité permettant d'empêcher l'émission de fibres d'amiante à l'extérieur de la zone concernée ;

2° Dans tous les cas, une aspiration avec filtration absolue »

(Article R.4412-130 du Code du Travail).

« Dans tous les cas où le retrait de l'amiante nécessite d'intervenir sur les matériaux contenant de l'amiante, une technique d'abattage des poussières [doit être] mise en œuvre, si possible à la source. Le matériel utilisé est, lorsqu'il peut en être doté, équipé d'un dispositif d'aspiration à filtration absolue » (Article R.4412-132 du Code du Travail).

Ainsi, en plus des mesures organisationnelles et de confinement, le recours à des dispositifs de filtration absolue ou à très haute efficacité est exigé (extracteurs d'air, aspirateurs, etc...).

2.2 Réglementation en matière d'équipements de protection individuelle amiante

2.2.1 Contexte général réglementaire

La directive 89/686/CEE concerne le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux équipements de protection individuelle. Elle fixe les obligations requises pour la mise sur le marché, la libre circulation intracommunautaire ainsi que les exigences essentielles de santé et de sécurité auxquelles les EPI doivent satisfaire en vue de préserver la santé et d'assurer la sécurité des utilisateurs (aussi bien dans un cadre professionnel, que sportif ou de loisirs).

Des normes européennes harmonisées sont élaborées par le Comité Européen de Normalisation (CEN) afin de traduire les exigences essentielles de la directive en des spécifications techniques détaillées.

La directive 89/686/CEE a été transposée en droit français essentiellement par la loi n°91-1414 du 31 décembre 1991 et les décrets n°92-765, 92-766 et 92-768.

La directive 89/656/CEE du 30 novembre 1989 considère de façon plus restrictive les utilisations professionnelles et concerne donc les prescriptions minimales de sécurité et de santé pour l'utilisation par les travailleurs au travail d'équipements de protection individuelle. Elle a été transposée en droit français essentiellement par les décrets n°93-40 et 93-41 du 11 janvier 1993.

Les dispositions législatives et réglementaires figurent dans la quatrième partie du Code du Travail, livre III, consacrée aux équipements de travail et moyens de protection.

2.2.1.1 Classification

Les EPI sont répertoriés soit en fonction des parties du corps qu'ils visent à protéger (tête, yeux, voies respiratoires, corps, pieds, etc...) soit en fonction des risques qu'ils visent à prévenir (chutes de hauteur, rayonnement, froid, substances dangereuses, etc...).

Ils sont classés en trois catégories en fonction du niveau de risque duquel ils sont censés protéger :

- **Catégorie I** : Il s'agit d'EPI de « conception simple dont l'utilisateur peut juger par lui-même de l'efficacité contre des risques minimes dont les effets, lorsqu'ils sont graduels, peuvent

être perçus en temps opportun par l'utilisateur et sans danger» (Directive 89/686/CEE, article 8 point 3).

- Catégorie II : Cette catégorie ouverte couvre tous les EPI qui ne sont pas recensés explicitement dans les deux autres catégories. La majorité des EPI rentrent dans cette catégorie.
- Catégorie III : Les EPI « de conception complexe destinés à protéger contre des dangers mortels ou susceptibles de nuire gravement et de façon irréversible à la santé et dont le concepteur présume que l'utilisateur ne peut déceler à temps les effets immédiats » (Directive 89/686/CEE, article 8 point 4). Il s'agit des EPI couvrant les risques graves (mortels ou irréversibles pour la santé).

2.2.1.2 Certification/ marquage CE

Le marquage CE sur un EPI est obligatoire. Il atteste que l'équipement est conforme aux exigences de la réglementation en vigueur dans l'union européenne (performance, efficacité et confort) et qu'il satisfait aux procédures de certification qui lui sont applicables et qui sont fonction de la catégorie de l'EPI. Les essais réalisés dans le cadre de l'évaluation de la conformité doivent être effectués par un organisme habilité et notifié à la Commission européenne.

2.2.1.3 Obligations du fabricant

La directive 89/686/CEE indique que le fabricant est responsable de la conformité de l'EPI et lui impose d'établir et de signer une déclaration de conformité CE.

Les normes européennes harmonisées au titre de cette directive traduisent les exigences essentielles de santé et de sécurité en des spécifications techniques détaillées. Le fabricant n'est pas tenu de suivre une norme harmonisée mais le recours aux normes harmonisées est le moyen le plus simple pour le fabricant d'établir que son équipement respecte les exigences essentielles de santé et de sécurité.

Le fabricant doit également fournir une notice d'instructions, essentielle à l'utilisateur pour juger du caractère approprié de l'équipement.

Cette notice doit notamment préciser :

- les performances offertes par ces équipements lors d'examens techniques visant à s'assurer des niveaux ou classes de protection des équipements de protection individuelle ; les classes de protection appropriées à différents niveaux de risques et les limites d'utilisation correspondantes ;
- les instructions de stockage, d'emploi, de nettoyage, d'entretien, de révision et de désinfection de ces équipements ; la date ou le délai de péremption des EPI ou de certains de leurs composants.

La notice d'instructions des EPI définit les limites d'utilisation auxquelles l'utilisateur doit se conformer.

2.2.1.4 Obligations de l'employeur

Les obligations de l'employeur sont définies dans la directive 89/656/CEE. Par transposition en droit français, le Code du travail (art. L.4321-1 à L.4321-5, R.4321-4 à R.4322-3, R.4323-91 à R.4323-106) précise les obligations du chef d'entreprise en matière de mise à disposition des EPI, caractéristiques, conditions d'utilisation, vérifications périodiques, information et formation des travailleurs.

Après avoir évalué les risques, l'employeur doit mettre à la disposition de ses salariés, si nécessaire, les équipements de protection appropriés aux risques et aux conditions de travail et veiller à leur maintien en état de conformité.

L'employeur doit également s'assurer du port effectif des EPI par ses salariés (article R.4321-4 du Code du Travail).

2.2.2 Rappel réglementaire relatif à la protection individuelle contre l'amiante

Parmi les dispositions réglementaires relatives à la protection des travailleurs exposés à l'amiante figurant aux articles R.4412-94 à R.4412-148 du Code du Travail, il existe des exigences réglementaires particulières en matière de protection individuelle vis-à-vis du risque amiante.

2.2.2.1 Rappel réglementaire des exigences relatives à la protection respiratoire contre l'amiante

La réglementation impose que « les appareils de protection respiratoire isolant à adduction d'air comprimé [soient] utilisés par tout intervenant dans la zone de travail, pour toute opération de confinement et retrait d'amiante ou de matériaux friables contenant de l'amiante ».

Il est également précisé que « les appareils de protection respiratoire à ventilation assistée avec masque complet de type TM3P sont une exception possible pour les opérations où l'utilisation de système à adduction d'air serait plus dangereuse. Ces appareils doivent fournir un débit d'air en charge d'au moins 160 L.min⁻¹ » (article R.4412-128 du Code du Travail).

Par ailleurs, « pour toute opération de confinement ou de retrait de matériaux non friables contenant de l'amiante, en fonction de l'évaluation du risque, tout intervenant est équipé d'un appareil de protection respiratoire isolant à adduction d'air comprimé avec masque complet, cagoule ou scaphandre, ou d'un appareil de protection respiratoire à ventilation assistée avec masque complet, de classe TM3P. Lors de l'enlèvement, sans détérioration, d'éléments dans lesquels l'amiante est fortement lié, une protection respiratoire de type P3 est admise » (article R.4412-133 du Code du Travail).

Ainsi, selon les différentes situations d'exposition à l'amiante, trois systèmes de protection respiratoire peuvent être rencontrés :

- Les APR isolants à adduction d'air comprimé avec masque, cagoule ou scaphandre
- Les APR filtrants à ventilation assistée de type TM3P avec masque complet
- Les protections respiratoires de type P3 (demi-masque filtrant FFP3, demi-masque et masque complet + filtre P3).

2.2.2.2 Rappel réglementaire des exigences relatives aux vêtements de protection contre l'amiante

« Tout intervenant dans la zone de travail doit être équipé en permanence de vêtements de travail étanches dotés de capuches, fermés au cou, aux chevilles et aux poignets, décontaminables ou, à défaut, jetables » (Article R.4412-128 du Code du Travail).

2.2.2.3 Travailleurs indépendants

Les travailleurs indépendants sont soumis aux dispositions particulières relatives aux risques d'exposition à l'amiante de la section 3 du chapitre II du titre 1^{er} du livre IV de la 4^{ème} partie du Code du Travail. De ce fait, les exigences en matière de protection respiratoire et vêtements de protection citées ci-dessus s'appliquent (Article R.4535-10 du Code du Travail).

2.3 Récapitulatif des exigences réglementaires relatives aux équipements de protection contre l'amiante

Le Tableau 1 présente les principales exigences réglementaires relatives aux équipements de protection collective et individuelle.

Tableau 1 : Récapitulatif des exigences réglementaires relatives aux équipements de protection collective et individuelle contre l'amiante

Protection	Confinement et retrait d'amiante		Activités et interventions sur matériaux ou appareils susceptibles de libérer des fibres d'amiante
	friable	Non friable	
Collective	Dépollution par aspiration avec un équipement doté d'un dispositif de filtration absolue (Art. R.4412-125, Art. R.4412-135) Confinement : construction d'une enveloppe étanche (Art. R.4412-125) Tunnel 5 compartiments ou à défaut 3 compartiments (Art. R.4412-126) Extracteurs équipés de préfiltres et de filtres absolus THE (rendement supérieur à 99.99% selon la norme NF X 44-013)	Aspiration par filtration absolue Confinement pouvant aller jusqu'à celui exigé pour amiante friable	Définis par le mode opératoire établi par l'employeur dans le cadre de l'évaluation des risques. Le mode opératoire est soumis pour avis au médecin du travail, aux membres du CHSCT ou à défaut aux délégués du personnel (Art. R.4412-140 et -141)
individuelle	Vêtements de travail étanches équipés de capuches, fermés au cou, aux chevilles et aux poignets, décontaminables ou, à défaut, jetables.		
	APR isolant à adduction d'air comprimé avec masque complet, cagoule ou scaphandre (Art. R.4412-128, Art. R.4412-133) Si impossible : : Ou APR ventilation assistée avec masque complet, de classe TMP 3, débit d'air > 160 L.min ⁻¹ . (Art. R.4412-128, Art. R.4412-133)		
	-	Enlèvement sans détérioration d'amiante fortement lié : protection respiratoire de type P3 admise (Art. R.4412-133).	

3 Normes d'exigences pour les équipements de protection collective contre l'amiante

Compte tenu de l'objectif de l'étude, ne seront abordées dans cette partie que les exigences relatives à la performance de filtration des dispositifs de protection collective. Les exigences électriques, mécaniques, etc... ne seront pas traitées.

Les performances de filtration des dispositifs de protection collective dans le domaine de l'amiante concernent les filtres à air à haute efficacité et absolus.

3.1 Les filtres à haute efficacité, à très haute efficacité, à très faible pénétration

L'article R.4412-127 du Code du Travail précise que la zone de travail doit être « maintenue en dépression par rapport au milieu extérieur par la mise en place d'extracteurs adaptés, équipés de préfiltres et de filtres absolus à très haute efficacité d'un rendement supérieur à 99,99% selon la norme NFX44-013 ».

Il est à noter que la norme NFX 44-013 : 1983 décrit une méthode d'essai permettant d'évaluer la perméance (équivalent de la pénétration, voir §3.1.3) des filtres à très haute efficacité mais qu'elle n'est pas une norme d'exigence. Cette norme a été élaborée sur la base d'un document rédigé par Eurovent (Association des fabricants d'équipement de traitement d'air et de réfrigération) : Eurovent 4/4 (Eurovent, 1984).

Des normes plus récentes (NF EN 1822 partie 1 à 5 : Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) : 2010) établies par le CEN concernent les exigences des filtres à haute efficacité, à très haute efficacité et absolus, et décrivent les méthodes et appareillages d'essais pour satisfaire à ces exigences :

- partie 1 : classification, essais de performance et marquage
- partie 2 : production d'aérosol, équipement de mesure et statistiques de comptage de particules
- partie 3 : essais de medias filtrants plans
- partie 4 : essais d'étanchéité de l'élément filtrant (méthode d'exploration)
- partie 5 : mesure de l'efficacité de l'élément filtrant

Il existait par ailleurs une classification Eurovent 4/4 des filtres à air à très haute efficacité (Darbord, 2003) en 5 catégories, mais cette classification a été remplacée par la classification établie selon la norme NF EN 1822 (Whyte, 2010).

3.1.1 Classification, exigences

La norme NF EN 1822 précise la classification des filtres à air à haute efficacité, à très haute efficacité et à très faible pénétration. Les éléments filtrants sont classés par groupe et par classes en fonction de leurs performances de filtration.

Concernant les filtres à haute efficacité ou absolus, on distingue 3 groupes (EN 1822-1) :

- groupe E : filtre EPA (filtre à air à haute efficacité)
- groupe H : filtres HEPA (filtres à air à très haute efficacité)
- groupe U : filtres ULPA (filtres à air à très faible pénétration)

Pour chaque groupe de filtres il existe plusieurs classes en fonction de leurs performances de filtration. Le tableau ci-dessous récapitule la classification des filtres à haute efficacité et les exigences en matière de performance (selon la norme NF EN 1822-1 : 2010).

Tableau 2 : Classification et exigences de performance des filtres à haute efficacité, très haute efficacité et très faible pénétration

Groupe de filtre / classe de filtre	Valeur globale		Valeur locale	
	Efficacité (%)	Pénétration (%)	Efficacité (%)	Pénétration (%)
E 10	≥ 85	≤ 15	-	-
E 11	≥ 95	≤ 5	-	-
E 12	≥ 99,5	≤ 0,5	-	-
H 13	≥ 99,95	≤ 0,05	≥ 99,75	≤ 0,25
H 14	≥ 99,995	≤ 0,005	≥ 99,975	≤ 0,025
U 15	≥ 99,9995	≤ 0,0005	≥ 99,9975	≤ 0,0025
U 16	≥ 99,99995	≤ 0,00005	≥ 99,99975	≤ 0,00025
U 17	≥ 99,999995	≤ 0,000005	≥ 99,9999	≤ 0,0001

Les filtres munis de média filtrant présentant une charge électrostatique sont classés conformément au tableau précédent sur la base de leur efficacité ou pénétration à l'état déchargé.

NB : il est à noter que le groupe H n'est pas équivalent à la classe H définie pour les aspirateurs domestiques à usage industriel (voir § 4.1).

3.1.2 Performance de filtration

Les exigences et les essais à réaliser pour répondre à ces exigences sont décrits dans la norme NF EN 1822-1.

Les dispositifs d'essais sont décrits en détail dans les normes NF EN 1822-3, -4 et -5.

Les méthodes individuelles de mesurage et les instruments de mesure sont décrits dans la norme NF EN 1822-2.

Les performances de filtration sont déterminées en trois étapes, chacune d'elles pouvant être mise en œuvre indépendamment :

- 1^{ère} étape : essais de médium filtrant plan
- 2^{ème} étape : essai d'étanchéité de l'élément filtrant
- 3^{ème} étape : essai d'efficacité de l'élément filtrant

3.1.2.1 1^{ère} étape : essais de médium filtrant plan

L'efficacité spectrale² des échantillons est déterminée pour une plage de dimensions de particules à la vitesse nominale sur le médium filtrant à l'état neuf et à l'état déchargé.

Si ces mesures mettent en évidence que le médium présente une charge significative, les éléments filtrants doivent être classés sur la base des mesures de l'efficacité ou de la pénétration des médias plans à l'état déchargé.

Il est possible d'utiliser un aérosol monodispersé ou polydispersé³.

Dans le cas d'un aérosol monodispersé, au moins six tailles d'aérosols d'essai doivent être produites avec des valeurs médianes de diamètre de particule appropriées et leur concentration doit être déterminée en amont et en aval de l'échantillon à l'aide d'un compteur à noyau de condensation.

Dans le cas d'un aérosol polydispersé, la distribution en taille peut être mesurée avant et après le filtre soumis à essai pour au moins 6 classes granulométriques à l'aide d'un compteur optique de particules.

La taille de particules pour laquelle la pénétration est la plus élevée (MPPS) est déterminée à partir de la courbe d'efficacité ainsi obtenue.

Dans tous les cas, il convient de s'assurer que la plage de mesures du compteur de particules et la plage de tailles de particules produites recouvrent le minimum de la courbe d'efficacité spectrale de manière à être certain de déterminer correctement la taille de particule la plus pénétrante.

3.1.2.2 2^{ème} étape : essai d'étanchéité de l'élément filtrant

Principe :

L'essai d'étanchéité permet de déterminer la pénétration locale des éléments filtrants des groupes H et U et de vérifier l'absence de fuite. La méthode de référence de cet essai est la méthode d'exploration par comptage de particules décrite dans l'EN 1822-4.

Au cours de l'essai d'étanchéité, l'échantillon doit être soumis au débit d'air nominal. L'aérosol d'essai, dont le diamètre moyen doit correspondre à la MPPS du médium filtrant, doit être réparti de façon homogène sur toute la section d'essai.

En aval de l'élément filtrant soumis à essai, la concentration en particules doit être échantillonnée à l'aide d'une ou plusieurs sondes d'échantillonnage qui doivent être déplacées avec une vitesse donnée. La concentration en particules doit être comparée à la concentration appliquée en amont.

Exigence :

La valeur limite de la pénétration locale mentionnée dans le Tableau 2 ne doit être dépassée en aucun point de la surface du filtre.

² Déterminer l'efficacité spectrale revient à déterminer l'efficacité de filtration pour différentes tailles de particules, afin d'établir une courbe d'efficacité en fonction de la taille des particules

³ Un aérosol monodispersé est constitué de particules de taille unique, alors qu'un aérosol polydispersé est constitué d'un ensemble de particules de taille différente.

3.1.2.3 3^{ème} étape : essai d'efficacité de l'élément filtrant

Principe :

L'efficacité de l'élément filtrant complet peut être déterminée par l'une des méthodes suivantes :

- mesurage intégral de la concentration en particules, en amont et en aval du filtre, avec sonde d'échantillonnage fixe (méthode de mesurage intégral) ;
- mesurage continu de la concentration en particules, en amont et en aval du filtre, au cours de l'essai d'étanchéité, avec une sonde d'échantillonnage fixe en amont et une sonde d'échantillonnage d'exploration en aval, se déplaçant sur toute la longueur de l'élément filtrant (méthode de scanning).

Dans tous les cas, l'efficacité globale de l'élément filtrant est déterminée à l'aide de l'aérosol d'essai MPPS à son débit d'air nominal.

Exigence :

La valeur de la pénétration globale ne doit pas dépasser celle mentionnée dans le Tableau 2.

3.1.2.4 Caractéristiques de l'aérosol d'essai et méthode de comptage

Pour effectuer les essais de filtres EPA, HEPA et ULPA, un aérosol de particules liquides est utilisé.

Le liquide utilisé doit être tel que la pression de vapeur à température ambiante soit si faible que la taille des gouttelettes produites ne varie pas de façon significative par évaporation pendant la durée de l'essai.

La norme NF EN 1822-2 décrit les substances qu'il est possible d'utiliser (DEHS, PAO, huile de paraffine) et leurs caractéristiques majeures : indice de réfraction, pression de vapeur et densité.

L'aérosol peut être monodispersé ou polydispersé même s'il est préférable qu'il soit monodispersé.

Les aérosols produits sont neutralisés de manière à se placer dans une situation la plus défavorable possible (« pire-cas »). En effet, les particules chargées électriquement sont généralement retenues plus efficacement par les filtres que celles qui ne le sont pas (NF EN 1822-2).

Le diamètre des particules doit être réglable de 0,04 µm à 1 µm.

Deux méthodes de comptage sont utilisables et dépendent de la taille des particules les plus pénétrantes :

- comptage optique des particules : plage de mesure : 0,1 µm à 2 µm.
- comptage par noyau de condensation : plage de mesure : 0,05 µm à 0,1 µm.

L'inconvénient de la méthode de comptage par noyau de condensation est la perte d'information sur la taille initiale des particules intrinsèque à la méthode qui consiste à faire grossir les particules avant de les compter.

3.1.3 Norme NF X 44-013 et classification des filtres

La réglementation fait référence à la norme NF X 44-013 : 1983. Cette norme est toujours en vigueur et n'a pas été abrogée du fait de la publication de la norme NF EN 1822-1 à -5.

En théorie, si l'on se réfère à la réglementation, les filtres à très haute efficacité doivent donc être évalués selon cette norme qui décrit une méthode d'essai très différente de la norme NF EN 1822.

La méthode d'essai décrite dans la norme NF X 44-013 s'applique aux filtres à très haute efficacité dont la perméance est supérieure à 10^{-5} . La perméance est définie par la norme comme étant le rapport de la concentration relative en aval sur la concentration relative en amont. La perméance est donc l'équivalent de la pénétration, terme qui sera donc retenu pour faciliter les comparaisons avec les autres méthodes décrites dans ce rapport.

La norme s'applique aux filtres à débit important. Les spécifications mentionnées peuvent également être appliquées aux essais des petits filtres ou échantillons filtrants à des débits compris entre 30 et 85 L.min⁻¹.

Principe de la méthode d'essai selon la norme NFX 44-013 :

La pénétration du filtre est évaluée par photométrie de flamme à l'aide d'un aérosol de chlorure de sodium dont les caractéristiques sont identiques à l'aérosol utilisé pour les essais des APR (dimension comprise entre 0,02 µm et 2 µm, diamètre médian en masse de 0,6 µm).

Le filtre à tester est monté sur un banc d'essai. L'humidité relative de l'air chargé en NaCl est inférieure à 60%. Le débit d'air dans le banc d'essai est réglé au débit préconisé par le fabricant. La pression doit être suffisante dans le banc pour qu'un débit d'au moins 40 L.min⁻¹ soit maintenu dans les sondes de prélèvement amont et aval.

Il est à noter que la concentration de l'aérosol en amont n'est pas définie.

Ancienne classification des filtres selon Eurovent 4/4 :

La classification des filtres à air à très haute efficacité selon Eurovent 4/4 (document ayant servi de base à l'élaboration de la norme NFX 44-013) a été remplacée par la classification selon la norme NF EN 1822, mais on retrouve encore actuellement des références à cette classification. Elle est basée sur les résultats des essais de pénétration au chlorure de sodium selon le document Eurovent 4/4. 5 catégories de filtres sont ainsi définies (Cf. Tableau 3).

Tableau 3 : Classification des filtres à air à très haute efficacité selon la recommandation eurovent 4/4 (Darbord, 2003)

Classification	Efficacité initiale E_i (%)	Pénétration initiale P_i (%)
EU 10	$95 \leq E_i \leq 99,900$	$5 \leq P_i \leq 0,100$
EU 11	$99,900 \leq E_i \leq 99,970$	$0,100 \leq P_i \leq 0,030$
EU 12	$99,970 \leq E_i \leq 99,990$	$0,030 \leq P_i \leq 0,010$
EU 13	$99,990 \leq E_i \leq 99,999$	$0,010 \leq P_i \leq 0,001$
EU 14	$99,999 \leq E_i$	$0,001 \leq P_i$

3.2 Conclusion sur les normes d'exigences relatives aux équipements de protection collective contre l'amiante

Des différences majeures existent entre les différentes normes citées précédemment, notamment dans le choix des caractéristiques de l'aérosol d'essai, dans l'évaluation de l'efficacité et dans la méthode d'analyse utilisée.

La norme NF X 44-013 impose la mise en œuvre d'un aérosol de chlorure de sodium, de granulométrie similaire à celle de l'aérosol utilisé pour les appareils de protection respiratoire. Néanmoins la concentration en amont n'est pas définie. Les concentrations en amont et en aval sont déterminées par photométrie de flamme comme pour les APR.

La norme NF EN 1822 met en œuvre un aérosol liquide de préférence monodispersé, déchargé, dont la taille de particules a été préalablement déterminée comme étant la plus pénétrante pour le filtre à tester. Les concentrations en amont et en aval sont déterminées par comptage des particules (comptage global ou comptage optique).

La méthode d'essai NF EN 1822 permet de soumettre à essai des filtres à air à très faible pénétration ce qui n'est pas réalisable avec la méthode d'essai NF X 44-013 du fait de la limitation de détection (la photométrie est moins sensible que le comptage de particules). Par ailleurs, la norme NF EN 1822 exige que soit évaluée la pénétration locale et globale, ainsi que l'étanchéité de l'élément filtrant, ce que n'exige pas la norme NF X 44-013.

L'approche de la norme NF EN 1822 consistant à rechercher au préalable la taille de particules pour laquelle la pénétration est maximale avant d'effectuer les essais d'évaluation de la pénétration est la plus intéressante, puisque cette MPPS dépend de nombreux facteurs et notamment de la conception du filtre. Par ailleurs, les essais exigés sont plus complets et permettent d'évaluer également l'étanchéité de l'élément filtrant.

4 Aspirateurs à usage industriel

Ces équipements ne font partie ni des équipements de protection individuelle, ni des moyens de protection collective. Néanmoins, ils sont utilisés pour la dépollution des zones de travail et sont susceptibles de contribuer à l'exposition des travailleurs de par la remise en suspension possible de fibres d'amiante.

La réglementation en matière d'amiante impose que soient utilisés des aspirateurs munis de filtres à très haute efficacité ou absolus. Les filtres utilisés doivent donc répondre aux exigences de la norme NF EN 1822 citée au paragraphe 3.1. Mais il existe par ailleurs une classification des aspirateurs industriels destinés au ramassage des poussières dangereuses ainsi que des essais d'efficacité de l'élément filtrant de l'aspirateur et des essais d'efficacité de filtration de l'appareil assemblé.

Cette classification, ces exigences et ces essais sont détaillés ci-dessous.

4.1 Classification

La norme NF EN 60335-2-69 : 2005 et son amendement NF EN 60335-2-69/A2 : 2008 définissent les règles particulières pour les aspirateurs fonctionnant en présence d'eau ou à sec, y compris les brosses motorisées à usage industriel et commercial.

L'annexe AA de cette norme définit les exigences particulières pour les aspirateurs, les balayeuses à aspiration et les extracteurs de poussières destinés au ramassage des poussières dangereuses pour la santé.

Ces appareils sont classés en trois catégories en fonction de la classe de poussières :

- classe L (risque faible) : appareil approprié pour enlever les poussières possédant une valeur limite d'exposition supérieure à 1 mg.m^{-3}
- classe M (risque moyen) : appareil approprié pour enlever les poussières possédant une valeur limite d'exposition supérieure à $0,1 \text{ mg.m}^{-3}$
- classe H (risque important) : appareil approprié pour enlever les poussières quelle que soit la valeur limite d'exposition, y compris les poussières cancérogènes ou pathologiques.

Les aspirateurs utilisés dans le domaine de l'amiante doivent donc être de classe H.

4.2 Exigences

Compte tenu de la problématique traitée dans ce rapport, les exigences ne nécessitant pas la mise en œuvre d'aérosol de particules dans les essais de vérification ne sont pas abordées dans cette partie.

Les exigences relatives à l'efficacité des appareils de classe H, concernent donc essentiellement le degré de pénétration des poussières et un degré de résistance à l'éclatement lors d'un fonctionnement anormal (colmatage).

4.2.1 Degré de pénétration

La pénétration maximale, pour les appareils de classe H, de l'élément du filtre principal et de l'appareil assemblé doit être inférieure à 0,005%.

4.2.2 Résistance à l'éclatement

Le filtre principal de l'appareil de classe H doit présenter une résistance suffisante, c'est-à-dire ne pas subir de rupture ou d'avarie, lorsqu'il est colmaté et soumis par l'air à des impulsions.

4.3 Essais

4.3.1 Essais de l'élément du filtre principal

Dispositif d'essai :

Pour les appareils non munis d'un conduit de sortie : l'appareil est placé dans une cabine. Tous les filtres sont retirés à l'exception du filtre principal. L'essai est réalisé avec un filtre principal neuf.

La cabine est munie d'un conduit d'extraction d'air.

La substance d'essai est prélevée par l'aspirateur. La concentration en agent d'essai est mesurée en amont de l'aspirateur et en aval (dans le conduit d'extraction d'air).

Pour les appareils munis d'un conduit de sortie, l'appareil n'est pas nécessairement placé dans une cabine : la concentration en agent d'essai est mesurée en amont et en aval de l'appareil au niveau des conduits d'entrée et de sortie de l'appareil.

Aérosol d'essai :

Il s'agit d'un brouillard à diffusion réduite composé d'huile de paraffine, de particule d'huile dispersée (DOP : Dioctyl Phtalate) ou de NaCl, à une concentration comprise entre 10 et 100 mg.m⁻³.

L'aérosol est tel que 90% des particules ont un diamètre de Stokes < 1µm.

Détermination de la pénétration :

La pénétration est mesurée en continu via un photomètre à fonctionnement intégral ou un compteur de particules approprié. La valeur de la pénétration est établie après 20 min de fonctionnement.

4.3.2 Essai de l'appareil assemblé

L'appareil est positionné dans une cabine comportant un conduit d'extraction.

L'agent d'essai est une poussière polydispersée de répartition en tailles de particules 10% < 1µm, 22% < 2 µm, 75% < 5 µm. La concentration de l'agent d'essai doit être de 5 mg.m⁻³ pendant la durée de l'essai.

La pénétration est déterminée après un minimum de 3 cycles, lorsque la vitesse d'air est de 20 m.s⁻¹ dans le diamètre nominal du tuyau d'aspiration et après un temps maximal de mesure de 8 heures. La pénétration est déterminée, soit par gravimétrie, soit par un système de mesure équivalent (ratio de la concentration en aval sur la concentration en amont).

A l'issue de cet essai, un nouveau test de l'élément du filtre principal doit être réalisé (Cf. § 4.3.1).

4.3.3 Essai de résistance à l'éclatement

Un produit de colmatage (craie de tailleur par exemple) est utilisé pour provoquer 90% de la différence maximale de pression déterminée lors de la mesure de P_i^4 . Un effet de pulsations est alors produit en couvrant l'entrée de l'appareil pendant 5s et en l'ouvrant ensuite pendant 1s.

Cet essai de pulsation est répété 30 fois sur une période de 3 min.

La norme ne décrit pas plus en détail la mise en œuvre de cet aérosol.

4.4 Conclusion

La norme NF EN 60335-2-69 relative aux aspirateurs industriels est moins précise dans le choix de l'aérosol à tester et dans les conditions d'essai.

L'aérosol utilisé pour l'essai de pénétration de l'élément du filtre principal ne correspond peut-être pas à la taille de particules les plus pénétrantes : la norme exige en effet que 90% des diamètres de Stokes de l'aérosol soient inférieurs à $1\text{ }\mu\text{m}$, ce qui n'est pas assez précis quant à la répartition granulométrique de l'aérosol au niveau des tailles correspondants à la pénétration maximale qui sont généralement comprises entre $0,05$ et $0,5\text{ }\mu\text{m}$ (Hinds, 1999).

Pour l'essai de l'appareil assemblé, les caractéristiques de l'aérosol sont définies un peu plus précisément (poussière polydispersée de répartition en tailles de particules $10\% < 1\text{ }\mu\text{m}$, $22\% < 2\text{ }\mu\text{m}$, $75\% < 5\text{ }\mu\text{m}$), mais la granulométrie ne correspond pas aux tailles de particules les plus pénétrantes.

La référence à cette norme n'est donc pas un critère suffisant pour apprécier l'efficacité d'un aspirateur industriel vis-à-vis des MPPS. Toutefois, un aspirateur destiné au ramassage des poussières amiantées doit être muni de filtres à très haute efficacité ou très faible pénétration. Ce type de filtre doit répondre aux exigences de la norme NF EN 1822 qui permettent d'apprécier les performances offertes par cet appareil vis-à-vis des MPPS.

⁴ P_i représente la puissance absorbée lorsque l'appareil fonctionne depuis 20s avec le suceur obturé immédiatement après 3 min de fonctionnement suceur ouvert.

5 Normes d'exigences pour la protection individuelle contre l'amiante

Dans cette partie sont détaillées les différentes normes d'exigences applicables aux appareils de protection respiratoire (APR) et aux vêtements de protection utilisables pour se protéger de l'amiante.

Concernant les APR, il est à noter que la cagoule utilisée avec un système à ventilation assistée TH3P peut être utilisée pour se protéger de l'amiante (INRS, 2007) même si ce dispositif n'est pas cité explicitement dans la réglementation (Cf. §. 2.2.2.1). C'est pourquoi la norme d'exigence se rapportant à ce type d'APR est également détaillée dans cette partie.

5.1 Protection respiratoire

5.1.1 Classification générale

Il existe deux catégories d'appareils de protection respiratoire en fonction de leur principe de fonctionnement :

- les appareils filtrants : ces appareils purifient l'air ambiant respirable au moyen de filtres capables d'éliminer les contaminants présents dans l'air ;
- les appareils isolants : ces appareils sont alimentés en air ou en gaz respirable provenant d'une source non contaminée.

Les appareils filtrants peuvent être à ventilation libre ou bien à ventilation assistée. Un appareil filtrant à ventilation libre peut être composé d'une pièce faciale et d'un filtre ou bien d'une pièce faciale filtrante. Un appareil filtrant à ventilation assistée est composé d'une pièce faciale (1/2 masque, masque complet, cagoule, casque, etc...) et d'un ventilateur motorisé qui fournit de l'air au porteur au travers d'un ou plusieurs filtres.

Les appareils isolants peuvent être autonomes. Dans ce cas, l'air ou le gaz respirable provient d'une bouteille (source) se trouvant sur l'individu lui-même. Les appareils peuvent également être non autonomes et dans ce cas, le porteur est relié à une source d'air respirable se trouvant à distance via un tuyau d'alimentation.

La Figure 1 présente les différents types d'appareils de protection respiratoire. Les types d'APR réglementairement autorisés pour se protéger de l'amiante sont signalés en rouge et soulignés. Il est à noter que l'utilisation de la cagoule à ventilation assistée de classe TH3P n'est pas mentionnée dans la réglementation mais qu'il est possible d'utiliser cet équipement en milieu amianté.

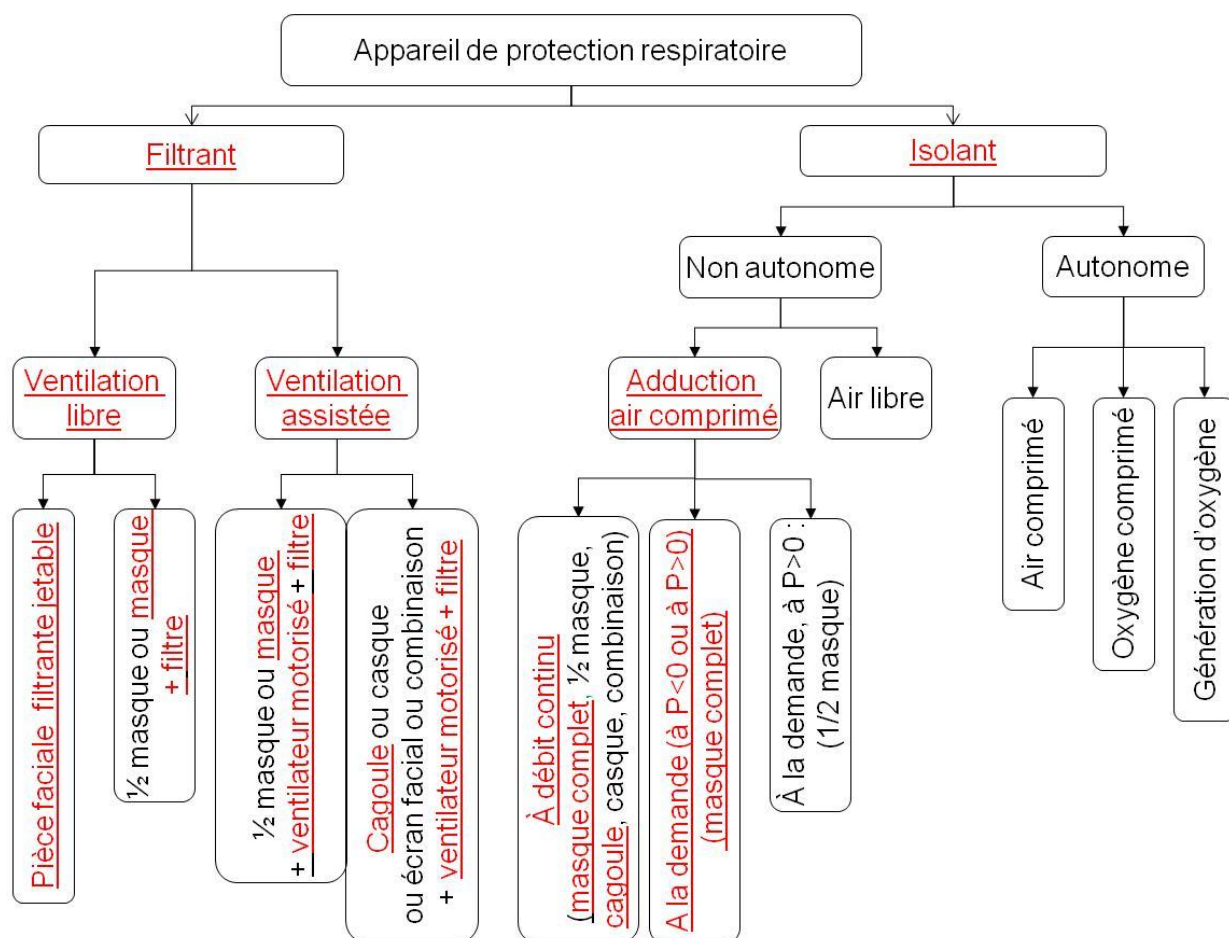


Figure 1 : Types d'appareils de protection respiratoire

5.1.2 Normes harmonisées d'exigence APR Amiante

Les APR contre l'amiante sont soumis au même titre que les autres EPI à la directive européenne 89/686/CEE, et doivent donc à ce titre répondre aux exigences essentielles de santé et de sécurité de la directive.

Les normes européennes harmonisées définissant les exigences de performances, d'essais et de marquage pour les trois systèmes de protection respiratoire utilisables contre l'amiante sont les suivantes :

- Les APR isolants à adduction d'air comprimé avec masque, cagoule ou scaphandre :
 - NF EN 14594 : 2005 : appareil de protection respiratoire - appareil de protection respiratoire isolant à adduction d'air comprimé à débit continu – Exigences, essais, marquage.
 - NF EN 14593-1 : 2005 : appareil de protection respiratoire - appareil de protection respiratoire isolant à adduction d'air comprimé avec soupape à la demande – Partie 1 : Appareil avec masque complet - Exigences, essais, marquage.
- Les APR filtrants à ventilation assistée de type TM3P avec masque complet
 - NF EN 12942 : 1998 + A1 : 2003 + A2 : 2009 : appareil de protection respiratoire - appareils filtrants à ventilation assistée avec masques complets, demi-masques ou quart de masques – Exigences, essais, marquage.
- Les APR filtrants à ventilation assistée de type TH3P avec cagoule

- NF EN 12941 : 1998 + A1 : 2004 + A2 : 2009 : appareil de protection respiratoire - appareils filtrants à ventilation assistée avec casque ou cagoule – Exigences, essais, marquage.
- Les protections respiratoires de type P3.
 - NF EN 136 : 1998 : appareil de protection respiratoire – masques complets – Exigences, essais, marquage
 - NF EN 143 : 2000 et A1 : 2006 : appareil de protection respiratoire – filtres à particules – Exigences, essais, marquage.
 - NF EN 140 : 1998 : appareils de protection respiratoire – Demi-masques et quart de masques – Exigences, essais, marquage
 - NF EN 149 et A1 : 2009 : appareils de protection respiratoire – Demi-masques filtrants contre les particules – Exigences, essais, marquage

La classification des différents APR est réalisée selon leurs performances au regard des exigences normatives.

5.1.3 Exigences de performances requises pour les appareils de protection respiratoire contre l'amiante

Les exigences de performances requises pour les appareils de protection respiratoire sont très variées et concernent aussi bien l'emballage, la compatibilité avec la peau, le colmatage, les matériaux, que la fuite, la teneur en CO₂ de l'air inhalé, par exemple.

Seules les exigences de performance majeures au regard de l'efficacité de protection des appareils de protection respiratoire utilisables contre l'amiante et les essais techniques visant à vérifier ces exigences sont présentés et détaillés dans cette partie, à savoir :

- la pénétration du filtre
- la fuite vers l'intérieur
- la fuite totale vers l'intérieur
- la résistance respiratoire
- la résistance au colmatage
- la résistance mécanique
- l'étanchéité
- la performance pratique

Les exigences et les normes correspondantes sont récapitulées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Principales exigences au regard de l'efficacité de protection applicables aux APR amiante

APR contre l'amiante		Norme harmonisée d'exigences	Principales exigences et essais							
			Pénétration du filtre	Fuite vers l'intérieur	Fuite totale vers l'intérieur	Résistance respiratoire	Résistance au colmatage	Résistance mécanique	Étanchéité	Performance pratique
APR isolant à adduction d'air comprimé : masque, cagoule, scaphandre		NF EN 14594 : 2005	-	X	-	X	-	-	X	X
		NF EN 14593-1 : 2005 :	-	X	X	X	-	-	X	X
APR filtrant à ventilation assistée de type TM3P : masque complet		NF EN 12942 : 1998 + A1 :2003 + A2 : 2009	X	-	X	X	X	X	-	X
APR filtrant à ventilation assistée de type TH3P : cagoule		NF EN 12941 : 1998 + A1 :2004 + A2 : 2009	X	-	X	X	X	X	-	X
appareil filtrant de type P3	masque complet	NF EN 136 : 1998	-	X	Ou X si pas raccord filetage EN 148-1	X	-	-	X	X
	filtre	NF EN 143 :2000 et A1 : 2006	X	-	-	X	X	X	-	-
	½ masque	NF EN 140 : 1998	-	X	Ou X si pas raccord filetage EN 148-1	X	-	-	-	X
	½ masque filtrant	NF EN 149 + A1 : 2009	X	-	X	X	X	-	-	X

5.1.3.1 Pénétration du filtre

La pénétration du filtre est évaluée par la quantité de particules capable de traverser le filtre.

Principe de l'essai normatif :

Un aérosol de particules de chlorure de sodium (NaCl) est généré dans une chambre dans laquelle est positionné le filtre à tester. L'aérosol d'essai traverse le filtre avec un débit de $95 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ (ou au débit correspondant à la valeur maximale du débit interactif pour les filtres utilisés avec les APR à ventilation assistée avec masque complet (NF EN 12942), ou au débit correspondant au débit d'air initial pour les APR à ventilation assistée avec cagoule (NF EN 12941)). L'aérosol de NaCl est analysé par photométrie de flamme, en amont et en aval du filtre soumis à essai.

La pénétration est mesurée pendant tout l'essai à des intervalles de mesure inférieurs à 5 min. L'essai est poursuivi jusqu'à ce que le filtre ait été exposé à 120 mg d'aérosol⁵, sauf si une décroissance continue de la pénétration est observée pendant une période de 5 min ou 5 intervalles de mesure. Pour les filtres réutilisables, le filtre est stocké pendant 24h dans les conditions décrites par la norme NF EN 13274-5, puis il est réexposé selon les mêmes conditions. La pénétration est mesurée comme une moyenne sur une durée de $(30 \pm 3) \text{ s}$, 3 minutes après le début de l'essai.

La pénétration du filtre est déterminée de la manière suivante :

$$P (\%) = \frac{C_2}{C_1} * 100$$

Avec : C_1 = concentration en NaCl en amont du filtre

C_2 = concentration en NaCl en aval du filtre

L'aérosol de NaCl généré est un aérosol polydispersé dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Concentration : $8 \pm 4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Répartition granulométrique : 0,2 à 2 μm
- Diamètre médian en masse : 0,6 μm .

Il est à noter qu'un essai de pénétration du filtre avec un aérosol d'huile de paraffine est également requis pour les filtres (EN 143 + A1), dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Concentration : $20 \pm 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Répartition granulométrique : environ 0,04 à 2 μm
- Diamètre de Stokes⁶ médian : 0,4 μm .

⁵ dans le cas des APR à ventilation assistée avec masque complet ou cagoule la masse spécifiée de l'aérosol est déterminée par la relation suivante : $m = C * Q * t$ (avec m = masse d'aérosol (mg), C = concentration en aérosol = $8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, Q = débit initial ou interactif divisé par le nombre de filtres équipés par appareil et $t = 8 \text{ h}$ (durée dans l'environnement de travail))

⁶ Le diamètre de Stokes correspond au diamètre d'une sphère chutant librement à la même vitesse que la particule

Exigences :

Les exigences de pénétration sont applicables aux filtres (NF EN 143), aux demi-masques filtrants (NF EN 149) et aux APR à ventilation assistée avec masques complets (NF EN 12942) et avec cagoules (NF EN 12941). Les exigences sont présentées dans le Tableau 5.

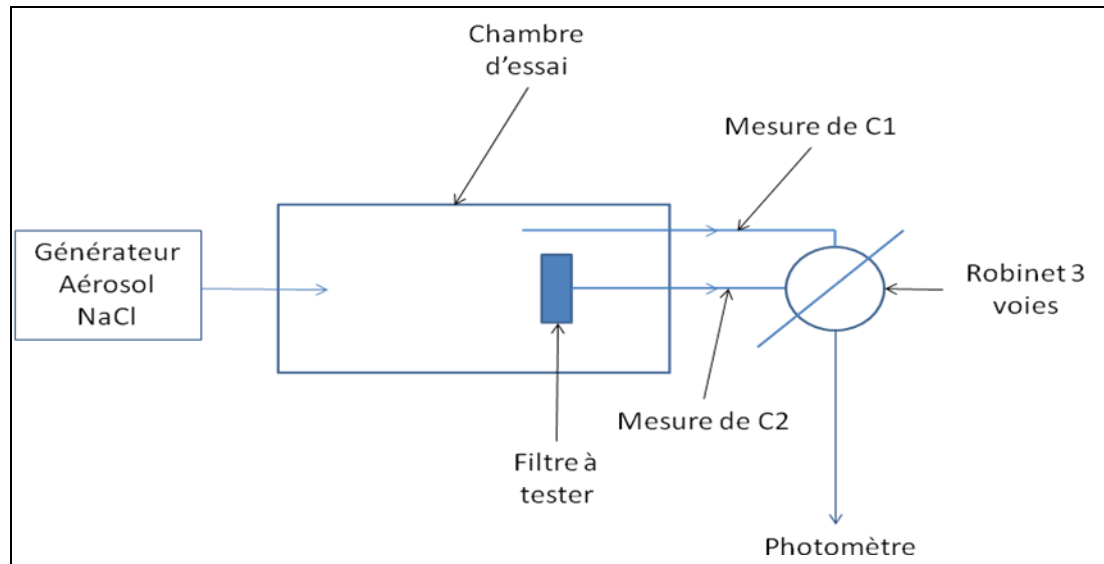


Figure 2 : Schéma du principe de mesure de la pénétration du filtre

Tableau 5 : Exigences relatives à la pénétration des filtres (en gras filtres utilisables pour se protéger de l'amiante)

Norme	Classe	Pénétration maximale du filtre (%)	
		Essai au chlorure de sodium à 95 L.min ⁻¹	Essai à l'huile de paraffine à 95 L.min ⁻¹
NF EN 149	FFP1	20	20
	FFP2	6	6
	FFP3	1	1
NF EN 143	P1	20	20
	P2	6	6
	P3	0,05	0,05
NF EN 12941	TH1P	10*	10*
	TH2P	2*	2*
	TH3P	0,2*	0,2*
NF EN 12942	TM1P	5 **	5**
	TM2P	0,5**	0,5**
	TM3P	0,05**	0,05**

* essai réalisé à un débit correspondant à la valeur du débit initial

** essai réalisé à un débit correspondant à la valeur maximale du débit interactif.

5.1.3.2 Fuite vers l'intérieur et fuite totale vers l'intérieur

La fuite vers l'intérieur et la fuite totale vers l'intérieur sont deux paramètres permettant d'apprécier le taux de particules pouvant pénétrer dans l'APR et être sources d'exposition pour le porteur :

- La fuite vers l'intérieur qui vise à prendre en compte toutes les sources de fuite possibles, à l'exception de la pénétration du filtre qui est évaluée spécifiquement : au visage (étanchéité de la pièce faciale sur le visage du porteur), valves, raccord, etc. ;
- La fuite totale vers l'intérieur englobe quant à elle la fuite vers l'intérieur et la pénétration du filtre. Elle est donc représentative de l'ensemble des fuites possibles.

La méthode de détermination des deux types de fuite est similaire. Ainsi, pour l'évaluation de la fuite vers l'intérieur, seule la pièce faciale est testée (le filtre est remplacé par un simulateur visant à reproduire la résistance induite par le filtre), et pour l'évaluation de la fuite totale vers l'intérieur, c'est l'ensemble (pièce faciale + filtre) qui est testé.

Il existe deux méthodes d'essai : une méthode utilisant un aérosol de particules solides de NaCl et une autre méthode utilisant un gaz (l'hexafluorure de soufre (SF₆)). En fonction de la norme d'exigence, l'une ou l'autre des méthodes est appliquée (Cf. Tableau 6). Pour les APR à adduction d'air et les pièces faciales, ces deux méthodes sont considérées comme équivalentes et les essais peuvent être réalisés selon l'une ou l'autre méthode.

Tableau 6 : Méthodes d'essai de fuite vers l'intérieur

norme	Type de pièces faciales et APR	Méthode d'essai NaCl ou SF ₆
NF EN 149 + A1	½ masque filtrant	NaCl
NF EN 140	½ masques et ¼ masques	NaCl ou SF ₆
NF EN 136	Masque complet	NaCl ou SF ₆
NF EN 12941	Ventilation assistée avec cagoule	NaCl
NF EN 12942	Ventilation assistée avec masque complet	NaCl
NF EN 14593-1	Isolant à adduction d'air comprimé avec soupape à la demande (avec ou sans pression positive), appareil avec masque complet	NaCl ou SF ₆
NF EN 14594	Isolant à adduction d'air comprimé à débit continu	SF ₆ (Si pièce faciale perméable) ou NaCl ou SF ₆ (si pièce faciale imperméable ou manifestement exposée à l'atmosphère)

Compte tenu de l'objectif de la présente étude qui consiste à comparer l'efficacité des APR vis-à-vis des aérosols d'essais normalisés et vis-à-vis des fibres d'amiante, seule la méthode de

détermination de la fuite vers l'intérieur et de la fuite totale vers l'intérieur, mettant en œuvre un aérosol de chlorure de sodium, sera développée.

Principe :

Plusieurs appareils sont soumis à essais. Un panel de sujets d'essai est choisi de telle manière que toutes les caractéristiques faciales d'utilisateurs-types soient couvertes. Le visage des sujets d'essai est décrit à l'aide de 4 dimensions faciales : longueur du visage, largeur du visage, profondeur du visage et largeur de la bouche.

Le sujet d'essai portant l'appareil soumis à essai effectue différents exercices (marcher, marcher en tournant la tête, parler, etc..) sur un tapis roulant situé dans une enceinte. Cette enceinte est traversée par un flux d'aérosol de chlorure de sodium de concentration constante. L'air à l'intérieur de la pièce faciale est prélevé et analysé par photométrie de flamme pendant la phase inspiratoire du cycle respiratoire. Seul l'air inhalé est prélevé. La concentration d'essai dans l'enceinte est également déterminée par photométrie de flamme (Figure 3).

La fuite P est calculée à partir des valeurs mesurées pendant les dernières 100s de chaque période d'exercice afin d'éviter de reporter des résultats d'un exercice à l'autre.

$$P (\%) = \frac{C_2}{C_1} * \left(\frac{t_{in} + t_{ex}}{t_{in}} \right) * 100$$

Avec C_1 = concentration d'essai

C_2 = concentration moyenne mesurée à l'intérieur de la pièce faciale

t_{in} = durée totale d'inhalation

t_{ex} = durée totale d'expiration.

Concernant les appareils à ventilation assistée avec cagoule (NF EN 12941), la fuite P est également calculée à partir des valeurs mesurées pendant les dernières 100s de chaque période d'exercice afin d'éviter de reporter des résultats d'un exercice à l'autre, mais de la façon suivante :

$$P (\%) = \frac{C_2}{C_1} * 1,25 * 100$$

Avec C_1 = concentration d'essai

C_2 = concentration mesurée à l'intérieur de la pièce faciale

Le facteur 1,25 tient compte de la rétention du NaCl dans les poumons. Ce facteur a été déduit en retenant l'hypothèse que le débit d'air de l'appareil est de 120 L.min⁻¹ et que le débit respiratoire du porteur est de 40 L.min⁻¹.

L'aérosol de NaCl généré pour les essais est similaire à l'aérosol généré pour les essais de pénétration des filtres, à savoir qu'il s'agit d'un aérosol polydispersé dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Concentration : 8±4 mg.m⁻³
- Répartition granulométrique : 0,2 à 2 µm
- Diamètre moyen en masse : 0,6 µm.

Il est à noter que dans les normes relatives aux APR à ventilation assistée avec masques complets et cagoules (NF EN 12942 et NF EN 12941), le diamètre de 0,6 µm doit être le diamètre médian en masse et non pas le diamètre moyen en masse.

Pour les cagoules/casques et combinaisons (NF EN 14594 et NF EN 12941), un ventilateur supplémentaire est utilisé pour permettre de générer un flux additionnel de 2 m.s^{-1} orienté successivement vers la partie antérieure, latérale et l'arrière de l'appareil.

Exigences :

Les exigences relatives à la fuite vers l'intérieur et la fuite totale vers l'intérieur des APR sont synthétisées dans le Tableau 7.

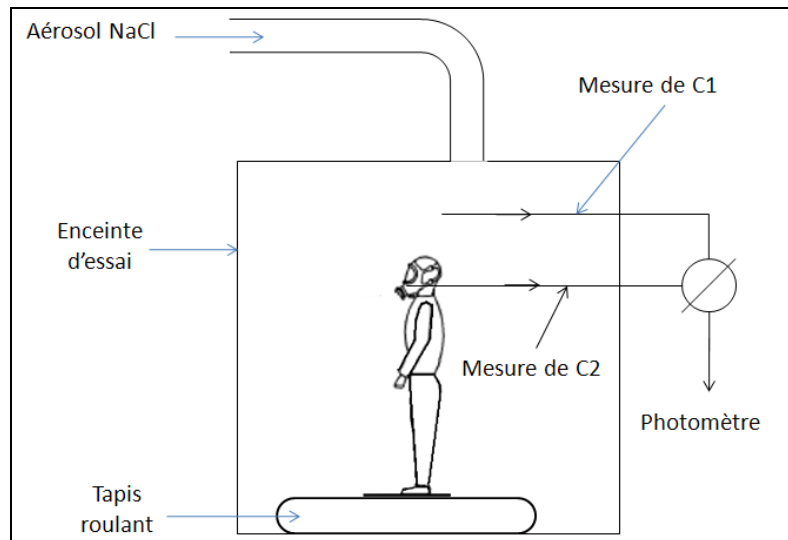


Figure 3 : Schéma du principe de mesure de la fuite vers l'intérieur (d'après NF EN 136)

Tableau 7 : Exigences relatives à la fuite vers l'intérieur et la fuite totale vers l'intérieur des APR (en gras sont précisées les exigences applicables pour les APR visant à protéger de l'amiante)

Norme	classe	Fuite vers l'intérieur maximale (%)	Fuite totale vers l'intérieur maximale (%)
NF EN 149	FFP1	-	25 (pour au moins 46 des 50 résultats individuels d'exercice (10 sujets * 5 exercices)) et 22 (pour au moins 8 des 10 moyennes arithmétiques relatives à chaque porteur)
	FFP2	-	11 (pour au moins 46 des 50 résultats individuels d'exercice (10 sujets * 5 exercices)) et 8 (pour au moins 8 des 10 moyennes arithmétiques relatives à chaque porteur)
	FFP3	-	5 (pour au moins 46 des 50 résultats individuels d'exercice (10 sujets * 5 exercices)) et 2 (pour au moins 8 des 10 moyennes arithmétiques relatives à chaque porteur)
NF EN 140	-	5 (pour 46 des 50 résultats individuels) et 2 (pour au moins 8 des 10 moyennes arithmétiques individuelles (10 sujets), calculées sur l'ensemble des périodes d'exercices)	-
NF EN 136	-	0,05 (pour chacun des 10 sujets d'essai pendant chacun des exercices d'essai)	-

Norme	classe	Fuite vers l'intérieur maximale (%)	Fuite totale vers l'intérieur maximale (%)	
NF EN 14593-1	-	0,05 (pour chacun des 10 sujets d'essai pendant chacun des exercices d'essai)	0,05 ^(*)	
NF EN 14594	1A et 1B	10	10 ^(*)	
	2A et 2B	2	2 ^(*)	
	3A et 3B	0,5	0,5 ^(*)	
	4A et 4B	0,05	0,05 ^(*)	
	(pour chacun des 10 sujets d'essai pendant chacun des exercices d'essai)			
NF EN 12941	TH1P	-	10	
	TH2P	-	2	
	TH3P	-	0,2	
NF EN 12942	-		Ventilation assistée en marche	Ventilation assistée à l'arrêt
	TM1P		≤ 5	≤ 5
	TM2P	-	≤ 0,5	≤ 1
	TM3P	-	≤ 0,05	≤ 0,1

^(*) Pour les pièces faciales qui ne possèdent pas de raccord à filetage standardisé, l'appareil complet est testé et, par conséquent, ce n'est plus la fuite vers l'intérieur qui est déterminée mais la fuite totale vers l'intérieur.

5.1.3.3 Résistance respiratoire

La résistance respiratoire représente la perte de charge induite par l'APR. Elle varie en fonction du débit respiratoire.

Principe :

De manière générale, le filtre ou l'APR est raccordé de façon étanche à l'appareil d'essai (tête de Sheffield par exemple). L'appareil d'essai permet de simuler une respiration. Les essais consistent à mesurer la perte de charge en débit continu ou sinusoïdal. Chaque norme d'exigence précise les conditions de débit et les exigences à satisfaire. Pour les pièces faciales et les APR filtrants à ventilation assistée ou isolant, les essais peuvent être réalisés avec des positionnements de la tête de Sheffield différents.

Les essais permettent de déterminer les résistances inspiratoire et expiratoire.

Pour les APR à ventilation assistée, les essais de résistance inspiratoire sont réalisés avec la ventilation assistée en marche et à l'arrêt.

Exigences :

Les exigences portent sur une perte de charge maximale à ne pas dépasser dans les conditions d'essais. La résistance respiratoire ne doit pas dépasser les valeurs mentionnées en annexe 4 (Tableau 14 à Tableau 19).

5.1.3.4 Résistance au colmatage

La résistance au colmatage est une exigence pour les filtres (NF EN 143 + A1), pour les pièces faciales filtrantes (NF EN 149 + A1) et les APR à ventilation assistée avec masques complets (NF EN 12942 + A1 + A2) et avec cagoule (NF EN 12941 + A1 + A2).

Principe :

- Pour les filtres :
 - l'essai consiste à faire passer de l'air empoussiéré à travers le filtre à un débit de 95 L.min^{-1} et à déterminer la quantité de poussière déposée sur le filtre lorsque la résistance respiratoire spécifiée est atteinte.
 - pour un filtre P3, l'essai est poursuivi jusqu'à ce que le produit de la concentration en poussières par la durée de l'essai soit égal à 263 mg.h.m^{-3} , ou jusqu'à obtention d'une résistance respiratoire de 7mbar.
- Pour les APR à ventilation assistée avec masque complet
 - l'essai consiste à exposer l'APR, fixé sur une tête factice de Sheffield reliée à une machine à respirer (régime sinusoïdal à $20 \text{ cycles.min}^{-1}$ et $1,5 \text{ L.coup}^{-1}$ ou régime continu à 95 L.min^{-1} pour les essais sans ventilation assistée et régime sinusoïdal à $25 \text{ cycles.min}^{-1}$ et $2,0 \text{ L.coup}^{-1}$ pour les essais avec ventilation assistée) à une atmosphère empoussiérée et à mesurer la résistance inspiratoire.
 - Pour un APR TM3P, l'essai est poursuivi jusqu'à ce que le produit de la concentration en poussières par la durée de l'essai soit égal à 200 mg.h.m^{-3} .
- Pour les APR à ventilation assistée avec cagoule
 - l'essai consiste à exposer l'APR, fixé sur une tête factice de Sheffield reliée à une machine à respirer (réglée à 30 L.min^{-1} (régime sinusoïdal à $20 \text{ cycles.min}^{-1}$ et $1,5 \text{ L.coup}^{-1}$) à une atmosphère empoussiérée et à mesurer la résistance inspiratoire.
 - Pour un APR TH3P, l'essai est poursuivi jusqu'à ce que le produit de la concentration en poussières par la durée de l'essai soit égal à 200 mg.h.m^{-3} .
- Pour les $\frac{1}{2}$ masques filtrants :
 - le principe est le même que pour les APR à ventilation assistée avec une machine à respirer réglée à $15 \text{ cycles.min}^{-1}$ et 2 L.coup^{-1} .
 - pour un $\frac{1}{2}$ masque filtrant de classe FFP3, l'essai est poursuivi jusqu'à ce que :
 - le produit de la concentration en poussières par la durée de l'essai soit égal à 833 mg.h.m^{-3} ,
 - ou pour les $\frac{1}{2}$ masques filtrant à soupape jusqu'à ce que la résistance inspiratoire de pointe ait atteint 7 mbar ou jusqu'à ce que la résistance expiratoire de pointe ait atteint 1,8 mbar.
 - Ou pour les $\frac{1}{2}$ masques filtrant sans soupape, jusqu'à ce que la résistance inspiratoire de pointe ou la résistance expiratoire de pointe ait atteint 5 mbar.

- Dans tous les cas, la poussière est constituée de Dolomie DRB 4/15 dont les caractéristiques sont mentionnées dans la norme EN 143. La concentration en poussière dans la chambre d'essai est de $400 \pm 100 \text{ mg.m}^{-3}$. Après exposition, la résistance respiratoire et la pénétration du filtre sont mesurées.

Exigences :

Après essai, les appareils doivent satisfaire aux exigences de résistance inspiratoire et aux exigences de pénétration spécifiées par les normes d'exigences.

5.1.3.5 Résistance mécanique

Cette exigence ne concerne que les filtres (NF EN 143) et les filtres utilisés avec les APR filtrants à ventilation assistée avec masque complet (NF EN 12942) ou avec cagoule (NF EN 12941).

Principe :

L'installation d'essai est composée d'une boîte en acier fixée sur un piston se déplaçant verticalement. La boîte est soulevée de 20 mm par une came en rotation et retombe sur une plaque d'acier.

Les filtres sont positionnés sur le côté de la boîte en métal. La came est réglée à une vitesse de rotation d'environ 100 rotations par minute, pendant 20 min.

Exigences :

Suite à l'essai de résistance mécanique, le filtre est soumis à l'essai de pénétration, et doit satisfaire aux exigences relatives à la pénétration (Cf. paragraphe 5.1.3.1).

5.1.3.6 Étanchéité

Les exigences et essais relatifs à l'étanchéité sont différents pour les masques (NF EN 136) et pour les APR isolants à adduction d'air (NF EN 14593-1 et NF EN 14594).

Masque (NF EN 136)

Principe :

Un masque complet est positionné sur une tête factice de Sheffield. Une pression négative de 10 mbar est produite à l'intérieur de la cavité de la pièce faciale. L'orifice d'inspiration est obturé et le disque de la soupape expiratoire est humidifié. La pression est mesurée à l'aide d'un manomètre.

Exigence :

La fuite du masque complet ne doit pas excéder celle indiquée pour un changement de pression de 1 mbar en 1 min, lorsque le masque est soumis à une pression négative de 10 mbar.

APR à adduction d'air comprimé (NF EN 14593-1 et NF EN 14594)

Principe :

L'APR est monté sur une tête factice de Sheffield reliée à une machine à respirer réglée sur 25 cycles.min⁻¹ et 2 L.coup⁻¹. L'APR complet est immergé dans l'eau pendant une durée de 3 à 5 cycles respiratoires (1 min). Deux séries d'essais sont effectuées avec des orientations de la tête de Sheffield différentes. La résistance respiratoire est mesurée avant et après chaque immersion.

Exigence :

Aucune bulle s'échappant de l'APR ne doit être observée.

Cet essai est réalisé avant et après les essais de résistance du tube d'alimentation en air, du harnais et des accouplements, et après tous les essais de laboratoire exigés par la norme.

5.1.3.7 Essai pratique de performance

Principe :

Les essais sont réalisés sur plusieurs APR, portés par différents sujets d'essai. Les sujets d'essai doivent réaliser une série d'exercices afin de simuler l'utilisation pratique des APR. Ces essais sont destinés à fournir une appréciation subjective de certaines propriétés, caractéristiques et fonction de l'APR, comme par exemple le confort de port, la tension causée par le débit ou la circulation de l'air, le champ de vision, etc....

La norme harmonisée EN 13274-2 : 2001 définit la méthode générale d'essai et liste une vingtaine d'exercices à réaliser, par exemple : marcher sur un plan horizontal avec une hauteur de passage ($1,3 \pm 0,2$) m pendant 5 min sur une distance approximative de 140 m (exercice 3), monter et descendre une échelle verticale en passant une fois dans chaque sens à travers une ouverture carrée de 460 mm, distance totale de 20 m (exercice 12), transporter un à un, 20 sacs de sable pesant chacun 12 kg sur une distance de 10 m et les placer côte à côte sur un plateau se trouvant à 1,5 m de hauteur (exercice 16), etc...). Les normes d'exigences spécifiques à chaque APR précisent les modalités de réalisation de ces essais : le conditionnement des APR avant essai, le nombre d'appareils à tester, le nombre de sujets d'essais, la séquence d'exercices à effectuer, etc....

Exigence :

Lorsque les essais montrent que l'APR comporte des imperfections, en ce qui concerne son acceptation par le porteur, le laboratoire doit décrire en détail les parties des essais pratiques de performance qui ont révélé ces imperfections.

Observations :

Ces exercices sont réalisés à des fins de mise sur le marché de l'APR, quelle que soit la nature de l'aérosol vis-à-vis duquel l'APR doit apporter une protection. La séquence d'exercices n'est donc pas spécifiquement représentative des mouvements que peut effectuer un travailleur sur un chantier de désamiantage.

5.2 Vêtements de protection

5.2.1 Rappel sur les types de vêtements de protection

Les vêtements de protection contre les particules appartiennent à la catégorie III.

Des normes européennes harmonisées définissent les exigences de performances de 6 types de vêtements de protection en fonction de l'état dans lequel se présentent les produits chimiques et du niveau de protection souhaité.

Les 6 types de vêtements de protection sont rappelés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8 : Normes harmonisées définissant 6 types de vêtements de protection

NF EN 13034	Vêtements de protection contre les produits chimiques liquides - Exigences relatives aux vêtements de protection chimique offrant une protection limitée contre les produits chimiques liquides (Équipement de type 6 et Type PB [6])
NF EN ISO 13982-1	Vêtements de protection à utiliser contre les particules solides - Partie 1 : exigences de performance des vêtements de protection contre les produits chimiques offrant une protection au corps entier contre les particules solides transportées par l'air (vêtements de type 5)
NF EN 14605	Vêtements de protection contre les produits chimiques liquides - Exigences de performances relatives aux vêtements dont les éléments de liaison sont étanches aux liquides (Type 3) ou aux pulvérisations (Type 4) , y compris les articles d'habillement protégeant seulement certaines parties du corps (Types PB (3) et PB (4))
NF EN 943-1	Vêtements de protection contre les produits chimiques liquides et gazeux, y compris les aérosols liquides et les particules solides - "Partie 1 : exigences de performance des combinaisons de protection chimique ventilées et non ventilées "étanches aux gaz" (Type 1) et "non étanches aux gaz" (Type 2)"

5.2.2 Exigences de performance requises pour les vêtements de protection contre l'amiante

Les vêtements utilisés pour la protection contre l'amiante relèvent du type 5 dont les exigences sont détaillées ci-dessous.

5.2.2.1 Généralités

Les exigences de performances relatives aux vêtements de type 5 sont spécifiées dans la norme harmonisée NF EN ISO 13982-1 : 2005. Un amendement à cette norme a été proposé en 2009 mais ce projet n'a pas encore le statut de norme harmonisée.

Ces exigences portent sur :

- les matériaux
- les coutures, jonctions et assemblages
- la combinaison complète
- les oculaires

Les exigences sur les matériaux sont relatives à des performances de résistance mécanique (résistance à l'abrasion, à la fissuration par flexion, au déchirement trapézoïdal, à la perforation). Il en est de même pour les oculaires. Ces exigences ne dépendant pas de la nature des aérosols contre lesquels les vêtements de type 5 doivent protéger, elles ne seront donc pas détaillées dans ce rapport.

Concernant les exigences sur les coutures, jonctions et assemblages, la norme précise que la pénétration des particules doit être minimale et que la performance au niveau des coutures/jonctions/assemblages peut être différente de celle du matériau mais doit être suffisante pour l'usage envisagé. Néanmoins, il n'y a pas d'essai particulier à mener pour vérifier cette exigence au niveau des coutures. Elle est implicitement vérifiée lors de l'essai de fuite vers l'intérieur requis pour la combinaison complète.

La fuite vers l'intérieur doit être déterminée conformément à la méthode d'essai décrite par la norme NF EN ISO 13982-2 : 2005.

Il est à noter que la norme NF EN ISO 13982-1 précise en introduction que l'aptitude d'un vêtement de type 5 doit être vérifiée pour chaque produit chimique spécifique, mais qu'il est exigé de recourir à un aérosol de NaCl pour la réalisation des essais de fuite vers l'intérieur (NF EN ISO 13982-2), ce qui induit une contradiction.

5.2.2.2 Fuite vers l'intérieur

Principe :

L'essai doit être réalisé par des sujets d'essai portant un équipement complet de protection conformément aux instructions du fabricant, c'est-à-dire avec des équipements supplémentaires ne faisant pas partie intégrante de l'article d'habillement comme par exemple un APR, des gants, des bottes...

Les combinaisons de protection sont soumises à l'essai de fuite vers l'intérieur d'aérosols de particules solides conformément à la méthode d'essai décrite par la norme NF EN ISO 13982-2, après la réalisation d'une série de mouvements permettant d'apprécier le confort et la résistance du vêtement et des assemblages.

Le principe est similaire à l'essai de fuite vers l'intérieur des masques respiratoires :

- un aérosol de particules de chlorure de sodium est vaporisé à l'intérieur d'une enceinte dans laquelle le sujet d'essai portant la combinaison de protection effectue une séquence d'exercices (marche à 5 km.h^{-1} , accroupissements, etc...) ;
- la concentration en chlorure de sodium est déterminée par photométrie de flamme à l'intérieur de la combinaison, en trois positions d'échantillonnage (au niveau de la poitrine à droite, au niveau de la taille dans le dos et latéralement à la hauteur du genou droit) et à l'intérieur de l'enceinte ;
- l'aérosol de chlorure de sodium doit avoir une distribution granulométrique, une concentration moyenne et une répartition à l'intérieur de l'enceinte conformes à la description de la norme NF EN 136 ;

Les paramètres suivants sont déterminés à partir de ces essais :

- le pourcentage de fuite vers l'intérieur au niveau de chaque position d'échantillonnage
- la fuite totale vers l'intérieur par combinaison
- la fuite totale vers l'intérieur par sujet
- la fuite totale vers l'intérieur par exercice
- la fuite totale vers l'intérieur par position d'échantillonnage
- la fuite totale vers l'intérieur moyenne.

Les essais sont réalisés avec au moins 5 sujets, chacun testant deux combinaisons.

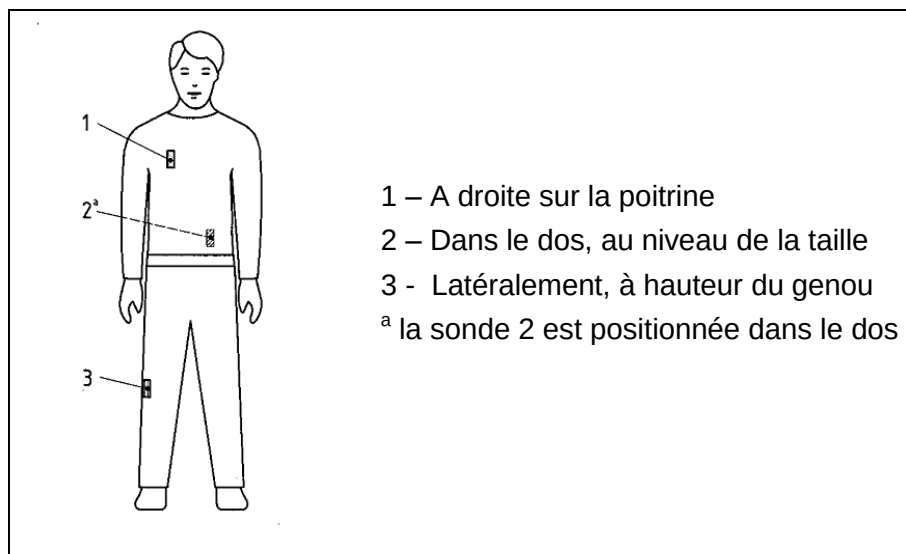


Figure 4 : Positionnement des sondes d'échantillonnage sur le corps du sujet (norme NF EN ISO 13982-2)

Exigence :

En notant :

- L_{ijmn} la fuite vers l'intérieur pour un sujet donné (i), une combinaison (j), un exercice (m) et une position d'échantillonnage (n),
- L_S la fuite totale vers l'intérieur par combinaison (moyenne de tous les exercices et de toutes les positions d'échantillonnage)

alors les vêtements de type 5 sont caractérisés par les paramètres suivants :

- $L_{jmn,82/90}$: la valeur de fuite vers l'intérieur correspondant à la 82^{ème} valeur L_{jmn} sur les 90 valeurs déterminées (c'est-à-dire sur l'ensemble des valeurs de fuite vers l'intérieur mesurées dans tous les exercices, toutes les positions d'échantillonnage, toutes les combinaisons de protection et triées en ordre croissant).
- $L_{S,8/10}$: la valeur de la fuite vers l'intérieur totale par combinaison de protection correspondant à la 8^{ème} valeur de L_S sur les 10 valeurs déterminées et triées en ordre croissant.

La norme exige le respect des critères suivants :

- $L_{jmn,82/90} \leq 30\%$
- $L_{S,8/10} \leq 15\%$

5.3 Conclusion

Les essais de certification européens des APR et des vêtements de protection de type 5 mettent en œuvre un aérosol polydispersé de chlorure de sodium dont les caractéristiques sont les suivantes :

- répartition granulométrique : 0,2 à 2 μm
- diamètre médian en masse : 0,6 μm .
- diamètre médian en nombre : environ 0,06 μm .

Les concentrations sont mesurées par photométrie de flamme.

Les paramètres critiques évalués avec cet aérosol sont les suivants :

- pénétration du filtre pour les APR
- fuite vers l'intérieur et fuite totale vers l'intérieur pour les APR et les vêtements de protection de type 5.

Il est à noter que le NIOSH qui certifie les APR de type N (non résistants aux aérosols huileux) aux Etats-Unis, utilise également un aérosol de NaCl mais dont les caractéristiques sont différentes.

En effet, pour les appareils de protection respiratoire, l'aérosol utilisé présente les caractéristiques suivantes :

- diamètre médian en nombre = $0,075 \pm 0,020 \mu\text{m}$ (écart type géométrique = 1,86)
- en considérant une densité de 2,13, l'aérosol a un diamètre aérodynamique médian en masse de 0,347 μm .

Les concentrations sont également déterminées par photométrie de flamme (NIOSH 1995, NIOSH 2007a, 2007b, 2007c, Eninger 2008b).

Les essais de certification des APR de type R (résistants aux aérosols huileux) et P (étanches aux aérosols huileux) par le NIOSH mettent en œuvre un aérosol polydispersé de dioctyl phtalate (DOP) de diamètre médian en nombre = $0,185 \pm 0,020 \mu\text{m}$ (écart type géométrique = 1,6). Les concentrations sont déterminées par photométrie (NIOSH 2007 d, e, f, g, h, i).

Les conditions des essais de certification du NIOSH sont considérées comme étant les plus sévères (Moyer et Stevens, 1989a, 1989b, Stevens 1989)

Ces conditions d'essai sont discutées au regard des différents facteurs d'influence sur l'efficacité des EPI dans la synthèse bibliographique (Cf. §11.1.3).

6 Recensement des EPC et EPI en fonction des activités

Le recensement des EPC et EPI utilisés dans le domaine de l'amiante ont été recensés à partir des catalogues des fournisseurs principaux dans le domaine. Une liste non exhaustive de fournisseurs est fournie sur le site internet de l'INRS : <http://www.amiante.inrs.fr>.

Les activités pour lesquelles ces équipements sont utilisés ont été déterminées à partir des informations obtenues des fabricants, des fournisseurs, des guides INRS ED 815 (INRS 2007) et INRS ED 809 (INRS 2010). La plupart des fabricants ou revendeurs ne précise pas spécifiquement pour quelles activités de désamiantage ou intervention sur matériaux amiantés les APR sont destinés.

Les APR recensés sont présentés dans le Tableau 9.

Les combinaisons utilisées dans le domaine de l'amiante doivent être des combinaisons de type 5. Sur le marché, on retrouve des combinaisons en TYVEK® (matériau non tissé en fibres de polyéthylène haute densité), en tissu tri-couche non tissé SMS (Spunbond / Meltblown / Spunbond) polypropylène, en matériau laminé microporeux Polypropylène associé à une couche en polyéthylène haute qualité. Les coutures peuvent être recouvertes du même matériau que la combinaison, surjetées à 3 fils, scellées, etc...

Les caractéristiques principales des installations de décontamination à trois compartiments sont les suivantes (source : Cahier des charges AFS nationale amiante⁷) :

1. Un compartiment "vestiaire sale" comprenant :

- Porte d'accès avec marche-pieds, revêtement du sol, mur, plafond, d'un matériau facilement lavable, supportant les projections d'eau ; sol étanche, équipé d'une évacuation d'eau ; patères pour vêtements ; "portes-poubelles" pour sacs jetables ; éclairage intérieur étanche ; lucarne pour éclairage naturel ; déprimogène à filtration absolue équipé d'un obturateur de filtres, posé manuellement.

2. Deux cabines* "douche" comprenant :

- Deux portes "entrée sortie" pour chaque douche. Ces douches sont situées entre le compartiment sale et le compartiment propre. Il n'y a pas d'autres possibilités de passage entre ces deux compartiments.
- Portes des douches équipées de grilles d'aération permettant à l'air de circuler au travers des douches, de la zone "propre" vers la zone "sale", sous l'effet de la mise en dépression du compartiment "sale" engendrée par le fonctionnement du déprimogène.
- Équipement traditionnel de douche complété par une patère permettant de suspendre provisoirement un équipement devant être lavé (masque respiratoire) ; sol équipé d'un

⁷ AFS nationale amiante : aide financière accordée par les CARSAT. L'objectif de cette AFS est d'aider les petites et moyennes entreprises qui interviennent en présence d'amiante et dont l'activité principale n'est pas en lien avec l'amiante à investir dans la mise en place de mesures de prévention des risques professionnels, et d'amélioration des conditions de travail. Il s'agit d'une action expérimentale limitée dans le temps. Cette aide financière est accordée pour l'achat d'aspirateur à filtre absolu et décolmatage, de bungalow à 3 compartiments et 2 douches (mobile ou fixe), deux masques complets à ventilation assistée.

revêtement anti-dérapant ; porte-savon ; robinet mélangeur ; douchette avec flexible sur réglette verticale ; éclairage naturel par le plafond plus éclairage en 12V.

- * Pour les entreprises d'effectif inférieur ou égal à 5 salariés, il est admis de subventionner l'acquisition d'un bungalow à une seule cabine de douche, en respectant le cahier des charges.

3. Un compartiment "vestiaires propres" comprenant :

- Porte d'accès avec marche-pieds, revêtement du sol, mur, plafond, d'un matériau facilement lavable, supportant les projections d'eau ; sol étanche, équipé d'une évacuation d'eau ; patères pour vêtements ; éclairage intérieur étanche ; lucarne pour éclairage naturel ; chauffage ; armoires vestiaires ; banc ; lavabo avec eau chaude ; miroir ; porte-serviette ; tablette ; prises de courants et box associés permettant de recharger les batteries des appareils de protection respiratoire à ventilation assistée ; grilles d'aération : entrée d'air neuf qui permet la ventilation de l'ensemble des compartiments par le fonctionnement du déprimogène ; chauffage.

4. Un compartiment technique :

- Accessible depuis l'extérieur, fermé à clé.
- Conçu pour regrouper les équipements techniques nécessaires au bon fonctionnement du bungalow notamment : tableau électrique avec son convertisseur 12V ; chauffe eau avec une réserve d'eau chaude suffisante ; espace disponible pour installer un aspirateur à filtration absolue (un trou pour le passage du tuyau de cet aspirateur est aménagé dans la cloison séparant ce compartiment et le « vestiaire sale ») ; porte d'accès extérieur équipée d'une large grille d'aération ; espace de rangement de l'unité de filtration pendant le transport.

Les caractéristiques des installations à 5 compartiments sont précisées dans le guide ED 815 de l'INRS (INRS, 2007). Elles sont rappelées ci-dessous :

- Zone de récupération (reliée ou non au compartiment n°1 : habillage lors du port de combinaisons jetables) :
 - Zone de repos spacieuse, aérée, éclairée, chauffée en saison froide, équipée de sièges et permettant de se désaltérer
 - Zone de stockage des EPI et filtres neufs
 - Chargement des batteries des masques à ventilation assistée
 - Portemanteaux pour tenue permettant d'aller des vestiaires à ce local et éventuellement de ce local au compartiment n° 1
 - Patères nominatives pour la suspension des masques
 - Glace pour vérifier la mise en place du masque sur le visage et le collage des adhésifs (combinaison jetable)
 - Point de branchement de l'adduction d'air
 - À proximité, sanitaires (lavabos, W-C)
- Compartiment n°1 : entrée, séchage lors de la sortie
 - Dimensionnement en fonction de la contiguïté de la zone de pause et l'éloignement des vestiaires ainsi qu'en fonction du nombre de salariés
 - Étagères pour stockage des serviettes propres
 - Corbeille ou sac pour dépôt des serviettes humides
 - Portemanteaux pour suspension des vêtements de sortie, si n° 1 non contigu à la zone de récupération
 - Point de branchement de l'adduction d'air (le cas échéant)
- Compartiment n°2 : douchage corporel (dans le sens de la sortie)
 - Une douche au minimum par groupe de cinq intervenants en zone de travail

- Crochet de suspension de l'appareil à ventilation assistée
- Douches et douchettes, débit minimal 10 l/min chacune
- Alimentation en eau à température et débit réglables ; cette eau ne doit pas être recyclée
- Évacuation de l'eau par pompe ; filtration avant rejet
- Porte-savon liquide (savon doux) ; porte-shampooing (shampooing doux)
- Siège rabattable permettant de prendre la douche, assis, dans le cas de travaux sollicitant fortement l'organisme (chaleur, etc.)
- Point de branchement de l'adduction d'air (le cas échéant)
- Compartiment n°3 : si utilisation de vêtements réutilisables : stockage, habillage et déshabillage ; si utilisation de vêtements jetables : déshabillage
 - Patères nominatives pour déposer les vêtements réutilisables, associées à un dispositif de séchage
 - Sièges pour se vêtir et se dévêtir (vêtements réutilisables)
 - Glace pour retirer le ruban adhésif
 - Casiers lavables pour le dépôt des bottes et casques
 - Conteneur ou sacs à déchets pour y déposer les surbottes, gants, combinaisons jetables, les filtres de protection respiratoire (retirés dans le compartiment n° 2)
 - Point de branchement de l'adduction d'air (le cas échéant)
- Compartiment n°4 : douchage des EPI (sens sortie)
 - Une douche minimum par groupe de cinq personnes présentes en zone
 - Crochet de suspension de l'appareil à ventilation assistée
 - Rampe fixe de douchage automatique multidirectionnel ou douchettes mobiles (débit minimal 10 l/min chacune)
 - Alimentation en eau à température et débit réglables ; cette eau ne doit pas être recyclée
 - Point de branchement de l'adduction d'air (le cas échéant)
- Compartiment n°5 : dépoussiérage par aspiration (sens sortie)
 - Dimensions permettant l'accueil de deux salariés au minimum et l'utilisation d'un aspirateur
 - Aspirateur à filtration absolue, poubelle
 - Point de branchement de l'adduction d'air (le cas échéant)

Concernant les équipements de protection collective de nombreux revendeurs ont été identifiés mais les modèles sont rarement précisés.

Les enveloppes étanches sont des films de protection en polyéthylène ou en polyéthylène polyane. Les sacs à déchets sont des conteneurs en toile polypropylène avec une poche intérieure en polyéthylène.

Le recensement des équipements de protection collectifs pourra être réalisé avec les informations issues de la campagne de mesure actuellement menée sur les chantiers de désamiantage qui devrait fournir des informations relatives au matériel et équipements utilisés, en fonction des différentes opérations. De même, les modèles des appareils de protection respiratoire utilisés pourront être précisés.

Si nécessaire, ce recensement pourra être complété en envoyant un questionnaire auprès des entreprises de désamiantage ou intervenant ponctuellement sur produits amiantés.

Tableau 9 : Recensement des APR amiante (les modèles de type FFP3 ne sont pas recensés du fait du trop grand nombre de fournisseurs et de modèles existants)

Fabricant	Modèle	Type	Activité mentionnée par le fabricant/revendeur
3M	Adduction d'air	Adduction d'air	Retrait d'amiante, préparation du site Amiante friable Amiante ciment
	régulateur RÉGULATEUR FLOWSTREAMT M		[Amiante] > 3 fibres.mL ⁻¹ sur 1 heure (opération de maintenance : Retrait de dalles vinyl-amiante, de joints amiantes, de câbles, ouverture de faux plafonds, démontage de tuyau calorifugé d'une chaudière, tronçonnage d'une canalisation)
	Powerflow XL + Masque complet Crusader	masque complet à ventilation assistée (filtre electret)	
	9332, 8835, Série 6000/7000 + 2135	Masque respiratoire FFP3 avec soupape (filtre electret)	Opération de maintenance : [Amiante] < 1 fibre.mL ⁻¹ sur 1 heure
	6800S/7907S + 2135	Masque complet + filtre P3 (filtre electret)	Opération de maintenance : [Amiante] < 3 fibre.mL ⁻¹ sur 1 heure
Sperian Protection	ZEPHYR – Amiante avec COSMO Raccord RD40 EPDM ou silicone (anciennement marque fernez) ZEPHYR – Amiante Panoramasque RD40 – EPDM ou silicone	masque complet à ventilation assistée (filtre P3 mécanique)	NR
	Appareil MC91A, coffret complet avec masque cosmo EPDM, filtre P3 double filetage	masque complet à adduction air	NR
Draeger Industrie	BelAir®GC + masque Xplore® 6300 ou Xplore® 6570 ou Xplore® 6530 ou demi- masque Xplore® 4700	Ventilation assistée	Démantèlement ou rénovation de bâtiments contenant de l'amiante
	Dräger X-plore®		

Fabricant	Modèle	Type	Activité mentionnée par le fabricant/revendeur
	7500		
	Dräger X-plore® 7300		
	Xplore 9000	Adduction d'air	
Lapro environnement (fournisseur du fabricant CleanAIR))	CleanAIR® Amiante + masque CleanAIR CA-6	Masque complet à ventilation assistée	Travaux de retrait d'amiante
	CleanAIR® Pressure for Mask + masque CleanAIR CA-6	Masque complet à adduction d'air	
Moldex Metrix AG&Co	Moldex serie 9000	Masque de protection respiratoire	NR
MSA Gallet	OptimAir 3000 A + masques panoramique OptimAir	Ventilation assistée	Ensemble conçu, entre autres, pour répondre à certaines réglementations nationales sur l'amiante
Scott Health and Safety	SCOTT sabre RAS amiante	Adduction air	NR
	Phantom Protector PPR2000	Ventilation assistée	
	Proflow SC	Ventilation assistée	
	Masques SARI ou Promask	Masques complets	
Turover Protection (Groupe Spasciani)	TM 1702 Electro- ventilateur à filtre avec masque complet TR 2002+ filtre 100 LD P3 R	Masque complet à Ventilation assistée Filtre mécanique	NR
	AC 190 respirateur isolant à air comprimé à flux continu avec masque TR 82	Adduction d'air	NR
Fernez	FERNEZ MC91A	Adduction air	NR
Sundström	SR 200 Airline A	Adduction air	NR
	SR 500 + masque SR 200 + filtre à particule SR 510	Ventilation assistée Filtre mécanique	NR

NR : non renseigné

Partie B : Synthèse bibliographique

7 Objectifs de la synthèse bibliographique

La synthèse bibliographique réalisée ici a pour objectifs :

- d'identifier les méthodes permettant d'évaluer l'efficacité de protection des MPC et EPI spécifiquement vis-à-vis de l'amiante et de les décrire lorsqu'elles existent ;
- de se prononcer sur la représentativité des essais normatifs mettant en œuvre un aérosol de particules caractéristiques des MPPS pour évaluer les performances d'efficacité de protection vis-à-vis des fibres d'amiante (notamment des FCA et FFA) ;
- de se prononcer sur la pertinence de déduire l'efficacité de protection dans les conditions réelles d'utilisation à partir de celle établie par des essais normatifs.

Ainsi, après un bref rappel des principes généraux de filtration de l'air, les méthodes permettant d'évaluer la filtration tout d'abord des EPI (en distinguant les appareils de protection respiratoire des vêtements de protection) puis des équipements de protection collective sont décrites et analysées. A noter que pour chacune de ces parties, un focus sur l'évaluation de l'efficacité spécifiquement vis-à-vis des fibres d'amiante est réalisé. Le comportement à la filtration des fibres d'amiante et des particules non sphériques est également étudié comparativement à la filtration des particules sphériques et des aérosols utilisés pour les essais normalisés (MPPS).

Pour la réalisation de cette synthèse bibliographique, les sources suivantes ont été consultées (sur une période allant jusqu'à juin 2010) : Pubmed, Science Direct, Google Scholar, les sites institutionnels (INRS, NIOSH, HSL, OSHA, IFA, etc....).

8 Rappels théoriques sur la filtration de l'air

Un filtre anti-particules est généralement constitué de fibres orientées de façon aléatoire, de diamètre, d'épaisseur et de densité variables. Il ne se comporte pas comme un tamis qui ne laisserait passer que les particules les plus petites. Les particules sont filtrées lorsqu'elles entrent en collision avec les fibres et sont retenues par celles-ci (Hinds, 1999).

Plusieurs mécanismes de collecte entrent en jeu, dont les principaux sont (voir également Figure 5) :

- la diffusion : sous l'effet de l'agitation brownienne⁸, les particules peuvent entrer en contact avec les fibres et y adhérer. Ce mécanisme est prépondérant pour des particules de taille inférieure à 0,1 μm . Ce phénomène de diffusion est d'autant plus important que la taille, la densité des particules et la vitesse de l'air diminuent.
- l'impaction inertielle : sous l'effet de leur inertie, les particules peuvent ne pas suivre l'écoulement d'air autour des fibres mais venir s'impacter sur les fibres. Ce phénomène concerne plutôt les plus grosses particules, généralement de taille supérieure à 1 μm . L'effet inertiel est proportionnel à la taille des particules, à leur densité et à la vitesse de l'air.
- l'interception: une particule (considérée comme sphérique) suivant l'écoulement de l'air est interceptée par une fibre lorsqu'elle s'approche de celle-ci à une distance inférieure à son rayon. Ce phénomène concerne les particules de l'ordre de quelques dixièmes de micromètres.
- les forces électrostatiques : il existe des forces attractives entre les particules et les fibres du média filtrant, à condition que les unes et/ou les autres soient chargées. Ces forces modifient la trajectoire des particules et peuvent ainsi favoriser leur capture par les fibres.

L'un ou plusieurs de ces mécanismes peuvent être plus ou moins prépondérants en fonction de la taille des particules et de leur charge électrique. L'efficacité d'un filtre vis-à-vis d'un aérosol est ainsi la résultante de l'ensemble de ces mécanismes.

En l'absence d'effet électrostatique, l'efficacité d'un filtre est considérée comme minimale pour des particules comprises entre 0,05 μm et 0,5 μm (Hinds, 1999). En effet, ce domaine correspond à des particules trop volumineuses pour que le mécanisme de diffusion soit efficace et trop petites pour que les mécanismes d'interception et d'impaction inertielle jouent un rôle essentiel (Figure 6). La dimension de la particule présentant ce minimum d'efficacité est qualifiée de taille de la particule la plus pénétrante (MPPS)).

⁸ Agitation brownienne : agitation permanente et aléatoire des molécules

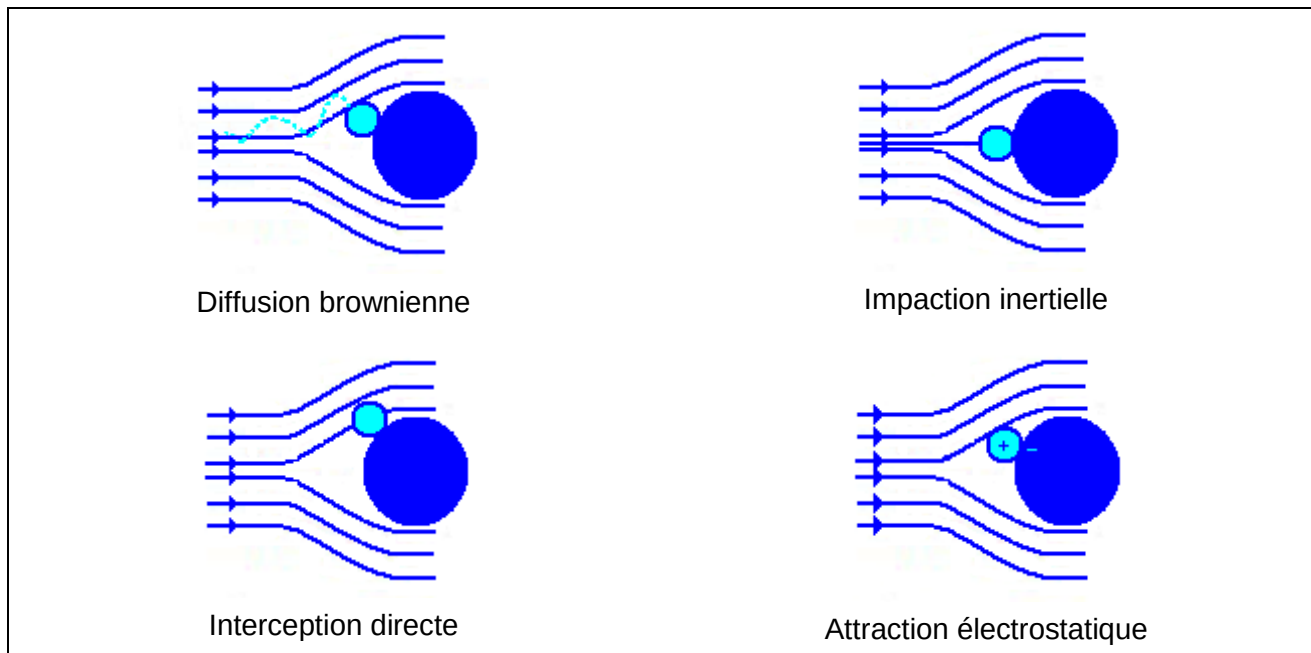


Figure 5 : Mécanismes de filtration d'une particule par un filtre à fibre

La figure suivante présente la courbe d'efficacité de filtration d'un filtre en fonction de la taille des particules et des mécanismes mis en jeu :

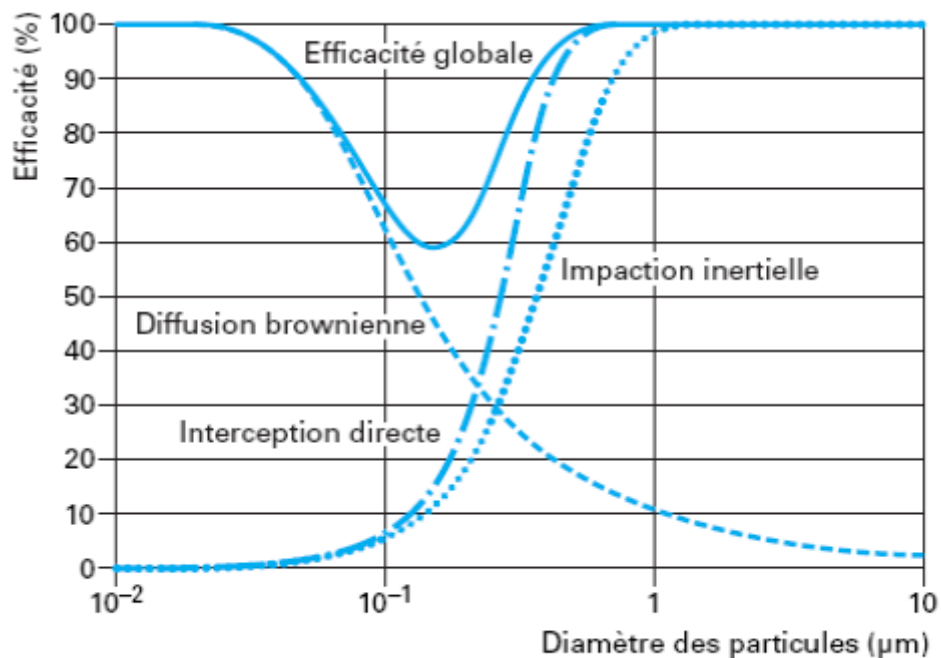


Figure 6 : Évolution de l'efficacité de filtration théorique en fonction du diamètre des particules

Rebond thermique

Pour les très fines particules, un phénomène appelé « rebond thermique » est susceptible de se produire. Il s'agit d'une chute de l'efficacité qui serait due au fait que la probabilité d'adhésion entre la fibre et la particule ne serait pas égale à 1 mais fonction de la taille et de l'énergie cinétique de la particule (Wang et Kasper, 1991).

Ce phénomène est encore mal connu à ce jour. De nombreuses études récentes, menées dans le domaine de la filtration des nanoparticules (Heim *et al.* 2005, Pui et Kim 2006, Huang *et al.* 2007, Thomas *et al.* 2008, Golanski *et al.* 2008), mettent en évidence l'absence du phénomène de rebond thermique pour les particules ayant un diamètre allant jusqu'à 2 nm.

9 Efficacité des équipements de protection collective contre l'amiante

9.1 Confinement

Quelques études visant à évaluer l'efficacité des équipements de protection respiratoire dans les chantiers de désamiantage permettent de mettre en évidence l'amélioration apportée par le confinement du chantier et par les techniques de travail à l'humide (Howie *et al.* 1996, INRS 1998).

Néanmoins, aucune étude visant spécifiquement à évaluer l'efficacité des techniques de confinement ni aucune étude visant à évaluer l'efficacité des matériaux utilisés pour le confinement n'ont pu être identifiées.

9.2 Filtres à très haute efficacité

Les filtres à très haute efficacité usités dans le domaine de l'amiante sont utilisés pour les extracteurs d'air et les aspirateurs.

Les facteurs d'influence sur ces types de filtres sont similaires à ceux détaillés pour la filtration des APR (Cf. §11.1.3).

Concernant la filtration des fibres d'amiante, Feigley et Chen (1992) ont mené des essais de pénétration d'aérosol de trémolite au travers de 4 média filtrant, dont 2 filtres en fibres de verre et deux filtres polyester, utilisés dans des systèmes de traitement d'air dans les bâtiments.

Les fibres ont été dénombrées et mesurées en longueur et diamètre par MEB (grandissement x2000). Le pourcentage de pénétration a été déterminé en fonction du diamètre des fibres plutôt qu'en fonction de la longueur puisque le diamètre aérodynamique d'une fibre dépend essentiellement de son diamètre géométrique et non de sa longueur.

Le diamètre géométrique médian de l'aérosol d'essai est de 0,86µm (écart type géométrique de 1,83) et sa longueur géométrique médiane de 21,47µm (écart type géométrique de 2,75).

Pour les filtres en fibre de verre testés, le maximum de pénétration se produit avec des fibres de diamètre compris entre 0 et 0,25µm. La pénétration maximale varie de 0,56% à 8,2% entre les deux filtres en fibre de verre. Les filtres composés des fibres les plus fines sont les plus efficaces.

Les filtres en polyester sont beaucoup moins efficaces que les filtres en fibres de verre (pénétration de 20 à 90%).

9.3 Conclusion

Très peu d'études ont pu être recensées concernant l'évaluation de l'efficacité de protection des équipements de protection collective vis-à-vis de l'amiante.

Seuls les filtres à haute efficacité et très haute efficacité ont été étudiés et, comme il sera argumenté plus loin, il semble que la filtration des fibres d'amiante soit supérieure à celle des aérosols qui sont utilisés dans les essais normatifs.

10 Aspirateurs à usage industriel

Trois études relatives à l'évaluation de l'efficacité des aspirateurs en atmosphère amiantée ont été relevées (Johnston et Loflin 1980, Johnston 1985, Kominsky *et al.* 1990). Ces études sont relativement anciennes, font appel à la MOCP ou à la META mais en ne prennent en compte que les fibres de longueur $> 5\mu\text{m}$.

Johnston et Loflin (1980) ont évalué les performances en matière d'émission de fibres et de pression d'aspiration de 9 aspirateurs industriels utilisés pour l'amiante, lorsque la capacité mentionnée par le fabricant était approchée, atteinte et dépassée. Une quantité connue de chrysotile est aspirée dans une pièce, le corps de l'aspirateur se trouve dans la pièce voisine. La concentration en amiante est déterminée en 2 points de mesure autour de l'aspirateur. Les échantillons ont été prélevés sur cassette 37 mm en configuration ouverte, avec membranes de diamètre de pores $0,8\mu\text{m}$. Les comptages ont été effectués par MOCP. Les concentrations ambiantes ne dépassaient pas la valeur limite en vigueur à l'époque qui était de 2 fibres.mL^{-1} .

Cette étude montre également l'aptitude des filtres HEPA à contenir l'émission de fibres lors de la rupture du sac. Lorsque la capacité maximale est approchée, une perte de succion significative est notée.

Johnston (1985) a mené une autre étude visant à évaluer l'émission de fibres d'amiante dans l'air à la sortie de 9 aspirateurs industriels. Les filtres utilisés dans ces aspirateurs sont de natures différentes (HEPA, papier, tissu, nylon, ...). La façon de procéder est similaire à l'étude précédente, mais la concentration des fibres dans l'air est déterminée en 4 points autour de l'aspirateur. Les résultats montrent que l'ensemble des aspirateurs émettent des fibres d'amiante. Au moment de l'étude la concentration ambiante ne dépassait pas la valeur limite qui était de 2 fibres.mL^{-1} mais les concentrations moyennes sont toutes supérieures à $0,1\text{ fibre.mL}^{-1}$.

En l'absence de connaissance de la concentration dans le tuyau d'entrée des aspirateurs, ces deux études ne peuvent pas servir à évaluer l'efficacité de filtration des aspirateurs. Elles permettent néanmoins de mettre en évidence une remise en suspension des fibres d'amiante sans toutefois permettre d'identifier les facteurs conduisant à ce phénomène.

Kominsky *et al.* (1990) ont évalué l'efficacité de deux techniques de nettoyage d'un tapis recouvert d'amiante : une méthode de nettoyage à l'humide et une méthode d'aspiration à sec à l'aide d'un aspirateur muni de filtre HEPA. Ils ont étudié l'efficacité de nettoyage du tapis en mesurant la quantité résiduelle d'amiante sur le tapis et la concentration en amiante dans l'air ambiant avant et pendant la phase de nettoyage, avec deux niveaux de contamination du tapis. Les comptages de fibres ont été effectués en META selon les règles de l'Asbestos Hazard Emergency Response Act (AHERA), à savoir que les fibres de longueur supérieur à $0,5\mu\text{m}$ et ayant un ratio longueur sur diamètre supérieur à 5 ont été comptabilisées (US EPA, 1987).

La technique de décontamination à l'humide est clairement la plus efficace. En outre, elle génère moins de fibres en suspension dans l'air que la technique mettant en œuvre un aspirateur à sec.

Ces études soulignent que les aspirateurs étudiés émettent des fibres dans l'atmosphère. Néanmoins, les résultats de ces études semblent difficilement extrapolables aux situations actuelles : d'une part car seules les fibres longues ont été comptabilisées, et d'autre part car le matériel a vraisemblablement évolué depuis.

11 Efficacité des équipements de protection individuelle

11.1 Protection respiratoire

11.1.1 Estimation de l'efficacité : établissement de « facteurs de protection »

11.1.1.1 Existence de différents facteurs de protection

L'efficacité de la protection offerte est estimée à partir du ratio de la concentration en polluant à l'intérieur de l'équipement de protection sur la concentration à l'extérieur de cet équipement de protection, qu'il s'agisse d'un appareil de protection respiratoire ou bien d'un vêtement de protection.

Dans la littérature, des facteurs de protection visant à quantifier le niveau de protection offert sont essentiellement définis pour les appareils de protection respiratoire, mais la notion de « facteur de protection » peut être ambiguë. En effet, différents types de facteurs de protection sont déterminés en fonction des conditions dans lesquelles sont mesurées ces concentrations : en laboratoire, dans des conditions réelles, dans des conditions d'exposition simulées, etc.... (Johnston *et al.* 1992).

La norme NF EN 529 (guide élaboré par le Comité Européen de Normalisation (CEN) et édité par l'Afnor en 2006 qui fournit des recommandations pour le choix, l'utilisation, l'entretien et la maintenance des appareils de protection respiratoire) définit ainsi 3 facteurs de protection :

- Le facteur de protection nominal (FPN) : il s'agit du « nombre calculé à partir du pourcentage maximal de fuite vers l'intérieur toléré dans les normes européennes pertinentes pour une catégorie donnée d'appareil de protection respiratoire ». Il s'agit donc d'un facteur de protection théorique déterminé à partir d'essais réalisés en laboratoire.

$$FPN = \frac{100}{\text{fuite}(\%)}$$

Par exemple : un masque complet (NF EN 136) équipé de filtre P3 (NF EN 143) doit avoir une fuite vers l'intérieur inférieure ou égale à 0,05% + 0,05%. Le facteur de protection nominal de ce type d'APR est donc égal à 1000.

- Le facteur de protection en situation de travail (FPST, en anglais WPF Workplace Protection Factor) : il équivaut au « rapport entre la concentration d'une substance dans la zone respiratoire du porteur (C_{ext}) et sa concentration dans la pièce faciale (avec un échantillonneur adéquat placé aussi près que possible de la bouche du porteur de l'appareil de protection respiratoire) d'un appareil de protection respiratoire en bon état de marche, correctement installé et utilisé sur le lieu de travail (C_{in}). »

$$FPST = \frac{C_{\text{ext}}}{C_{\text{in}}} * 100$$

- Le facteur de protection assigné (FPA) : il s'agit du « degré de protection respiratoire attendu sur le lieu de travail pour 95% des porteurs ayant reçu une formation, faisant l'objet d'une supervision adéquate et utilisant un appareil de protection respiratoire en bon état de marche et correctement adapté. Il est basé sur le 5^{ème} percentile de la distribution des facteurs de protection en situation de travail ».

Ces trois facteurs de protection sont ceux le plus souvent rencontrés dans la littérature, mais d'autres facteurs peuvent également être définis, parmi lesquels :

- Le facteur de protection en situation de travail simulé (SWPF : Simulated Workplace Protection Factor) : il s'agit d'un facteur de protection qui est déterminé en laboratoire à partir d'exercices ayant pour objectifs de simuler un travail (AIHA, 2008).
- Le facteur d'ajustage (FF : Fit Factor) : il s'agit du facteur permettant d'apprécier l'adéquation de la protection respiratoire au visage du porteur. Il peut être déterminé de manière qualitative ou quantitative (NF EN 529, Johnston *et al.* 1992, OSHA 2006).

Le Tableau 10 présente les facteurs de protection nominaux et assignés établis par différents pays pour les appareils de protection respiratoire visant à protéger des particules. Seuls les types d'APR étant recommandés pour se protéger de l'amiante (Cf. § 4.1.2) sont présentés dans ce tableau.

Tableau 10 : Facteurs de protection nominaux et assignés (issus NF EN 529, OSHA 2006, NIOSH 2004, INRS 2010b)

Norme	Description	Classe de filtres	Facteur de protection nominal	Facteurs de protection assignés							
				Fin	D	I	S	UK	France	USA	
				(NF EN 529 : 2006)					(INRS 2010b)	(OSHA 2006)	(NIOSH 2004)
NF EN 149	demi-masque filtrant	FFP3	50	20	30	30	20	20	10	10	10
NF EN 140	1/2 masque avec filtre	P3	48	-	30	30	-	20	10	10	10
NF EN 136	masque complet	P3	1000	500	400	400	500	40	30	50	50
NF EN 12941	appareils filtrants à ventilation assistée avec casque ou cagoule	TH3P	500	200	100	200*	200	40	40	25 par défaut ou 1000**	25
NF EN 12942	appareils filtrants à ventilation assistée avec masque complet, 1/2 masque	TM3P	2000	1000	500	400*	1000	40	60	50 (1/2 masque) 1000 (masque complet)	50 (1/2 masque ou masque + filtre HEPA)
NF EN 14593-1	Appareils de protection respiratoire isolants à adduction d'air comprimé avec soupape à la demande – Partie 1 : Appareils avec masque complet	-	2000	1000	1000	400	1000	40	-	50	50
NF EN 14594	Appareils de protection respiratoire isolants à adduction d'air comprimé à débit continu	1A/1B	10	-	-	-	-	-	-	50 (1/2 masque) 1000 (masque complet) 25 ou 1000** (cagoule /casque)	50 (1/2 masque) 50 (masque complet) 25 (cagoule / casque)
		2A/2B	50	-	-	-	-	-	-		
		3A/3B	200	-	-	-	-	-	-		
		4A/4B	2000	-	-	-	-	-	250		

* Valeur basée sur l'ancienne EN 146 pour les appareils THP1 / THP2 / THP3 et TMP1 / TMP2 / TMP3.

** le fabricant doit apporter la preuve du niveau de performance en menant des essais de détermination de facteur de protection en situation de travail ou situation de travail simulé. La valeur de 25 est donnée par défaut.

Il est à noter que les informations relatives aux études ayant permis de déterminer les facteurs de protection assignés ci-dessus sont limitées dans la littérature. En effet, même si de nombreuses études existent pour établir des facteurs de protection en situation de travail et assignés (Tannahill *et al.* 1990, Héry *et al.* 1991, Myers *et al.* 1995, Myers *et al.* 1998a et b, Spear *et al.* 2000, Nelson *et al.* 2001, Cohen *et al.* 2001, Duling *et al.* 2007, pour n'en citer que quelques unes), les FPA

présentent des variations extrêmes en partie en fonction de la façon dont ils ont été obtenus : traitement statistique des données initiales et des conditions de rejet de certaines études, variabilité des facteurs de protection déterminés en milieu de travail, variabilité des protocoles expérimentaux (Nicas et Neuhaus, 2004 ; Nelson 1996, Nelson *et al.* 2000, Vaughan et Rajan-Sithamparanadarajah 2005, Crump 2007).

La démarche suivie par les diverses autorités de réglementation ou par les instituts de normalisation pour établir les FPA mentionnés dans le Tableau 10 n'est pas explicitée et les études ayant servi à établir ces FPA ne sont pas citées. Seule l'OSHA explicite sa démarche dans le règlement fédéral (OSHA 2006).

11.1.1.2 Utilisation des facteurs de protection

Les facteurs de protection servent de critère de choix d'un APR pour les hygiénistes : lorsque le recours à un APR s'avère indispensable, celui-ci doit être choisi en fonction de la concentration maximale ambiante, et de son facteur de protection. Par exemple, un APR ayant un facteur de protection de 10 ne peut être utilisé que pour des situations dans lesquelles la concentration maximale du polluant dans l'air est de 10 fois supérieure à la valeur limite d'exposition professionnelle.

La problématique réside dans le choix du facteur de protection au vu des disparités existantes (FPA variables ou inexistantes).

Au niveau international, l'OSHA a intégré quelques FPA dans sa réglementation. Elle précise que « les FPA pour un type d'APR reflètent le niveau de protection en milieu de travail que ce type d'APR devrait fournir dans le cadre d'un programme de protection respiratoire efficace » (incluant la formation, les essais d'ajustage, la maintenance et les exigences d'utilisation). « Les FPA peuvent être utilisés par les employeurs pour déterminer la concentration maximale dans laquelle peut être utilisé l'APR » (OSHA 2006).

Le Royaume Uni mentionne également dans un guide de sélection des équipements de protection respiratoire adaptés pour les travaux avec l'amiante, les facteurs de protection pour les types d'APR visant à protéger des fibres d'amiante (HSE, 1999).

Au niveau national, la France n'a pas défini de facteurs de protection assignés pour l'amiante dans la réglementation.

Il est à signaler que l'INRS recommande des FPA pour les appareils de protection filtrants, à ventilation assistée et à adduction d'air qui sont des APR utilisables dans le domaine de l'amiante (Cf. Tableau 10). Les fiches métiers éditées par la CRAMIF donnent également des facteurs de protection (CRAMIF, 2005)

11.1.1.3 Perspectives

Il est à noter qu'au niveau européen, un projet de recherche dirigé par le réseau PEROSH (Partnership for European Research in Occupational Safety and Health, réseau européen de coordination et de collaboration de recherche en santé et sécurité au travail) vise à déterminer au niveau européen des facteurs de protection en milieu de travail pour différents type d'équipement de protection respiratoire de manière à améliorer les évaluations des risques.

Les principaux objectifs du projet sont les suivants :

- mettre au point un protocole standardisé pour la détermination des facteurs de protection en milieu de travail pour les équipements de protection respiratoire ;
- déterminer des facteurs de protection en milieu de travail afin d'obtenir des données relatives à la performance réelle des équipements de protection respiratoire dans des conditions bien définies ;
- évaluer l'efficacité de la formation relative aux équipements de protection respiratoire et de la mise en œuvre d'un programme de protection respiratoire en comparant les situations réelles d'utilisation avec les situations pour lesquelles un programme de protection respiratoire est clairement mis en œuvre.

La détermination de ces facteurs de protection, pour différents types d'APR, permettra d'améliorer les mesures de prévention dans le cadre de l'évaluation des risques professionnels.

(Sources : <http://www.perosh.eu/p/DA37526B3715A29DC125761900468C6F>, accédé le 20/08/10 ; <http://www.isrp.com/hongkong/abstracts/clayton02.htm>, accédé le 20/08/10).

Ce projet de recherche a débuté en janvier 2010 et doit être finalisé en 2013.

L'association américaine des hygiénistes industriels (AIHA) a publié par ailleurs sur son site internet un livre blanc en septembre 2009 qui liste les objectifs prioritaires en matière de besoin de recherche dans le domaine de la protection respiratoire (source <http://www.aiha.org/news-pubs/govtaffairs/Documents/Research-Resp%20Protection-11-09-09.pdf>, accédé le 25/03/10).

Sept axes de recherche prioritaires ont été définis, dont notamment :

- mesure des performances des APR ;
- essais d'ajustage qualitatifs pour les masques complets ;
- pertinence du critère « marge de sécurité » du facteur d'ajustage ;
- mesures à l'intérieur des masques ;
- évaluation de l'efficacité des exigences du programme de protection des voies respiratoires ;
- évaluation de l'efficacité des contrôles de la fuite au visage.

Il apparaît donc que la détermination de l'efficacité de protection réellement offerte au porteur d'un appareil de protection respiratoire est une problématique actuellement d'intérêt au niveau international. Des données complémentaires, basées sur des démarches plus harmonisées, devraient être disponibles dans les années à venir.

11.1.2 Composantes de l'efficacité des APR

Que l'on considère l'efficacité déterminée en laboratoire ou l'efficacité sur le terrain, l'efficacité des EPI peut être appréciée par différents paramètres :

- La pénétration du filtre : c'est à dire le pourcentage de particules ayant traversé le média filtrant ;
- La fuite vers l'intérieur : c'est-à-dire le pourcentage de particules ayant traversé la pièce faciale, sans tenir compte de la pénétration du filtre. Elle est composée de :
 - La fuite au visage : pénétration des particules due à une mauvaise étanchéité entre la pièce faciale et le visage du porteur
 - La fuite au niveau des valves expiratoires et inspiratoires
 - La fuite au niveau de tout raccord ou tout défaut de l'APR

La fuite totale vers l'intérieur est la résultante de la pénétration et de la fuite vers l'intérieur et représente le pourcentage de particules ayant traversé l'APR, toute source de fuite incluse. Ce paramètre est alors le reflet de l'efficacité globale.

Chaque voie potentielle de pénétration des particules a un poids différent sur l'efficacité globale de l'APR.

11.1.2.1 Pénétration du filtre

La pénétration du filtre est le critère le plus aisément vérifiable en laboratoire et ne dépend pas de la morphologie du porteur. La pénétration du filtre est un paramètre également facilement contrôlable par les fabricants et toujours en voie d'amélioration : les filtres peuvent avoir une pénétration $\leq 0,005\%$ pour les filtres d'APR et $\leq 0,000005\%$ pour les filtres à très faible pénétration, dans les conditions de laboratoire.

Néanmoins, ce paramètre ne représente qu'une contribution minime dans l'efficacité globale de l'APR ; le paramètre ayant le plus d'influence sur l'efficacité globale étant la fuite au visage pour les APR avec pièce faciale hermétique (type $\frac{1}{2}$ masque ou masque complet) (Grinshpun *et al.* 2009, Cho *et al.* 2009, Chen *et al.* 1990).

De nombreuses études visant à caractériser la pénétration des média filtrants vis-à-vis de différents paramètres (MPPS, vitesse de l'air, distribution des charges des particules, etc....) ont été publiées. Le paragraphe 11.1.3.1 présente l'influence des principaux facteurs sur l'efficacité de filtration.

11.1.2.2 Fuite vers l'intérieur

La fuite au visage est le paramètre le plus important dans l'efficacité globale pour les APR avec pièce faciale hermétique (Grinshpun *et al.* 2009, Cho *et al.* 2009, Chen *et al.* 1990).

A priori, les APR à ventilation assistée, avec pièce faciale hermétique, sont moins concernés que les APR à pression négative puisqu'il y a un apport d'air permettant d'éviter une dépression à l'intérieur de la pièce faciale qui entraînerait l'introduction de particules.

Néanmoins, cette surpression créée par le débit d'air entrant (au minimum 160 L.min^{-1} pour les APR à ventilation assistée amiante) peut être annulée par la demande respiratoire de l'opérateur. En effet, si la demande respiratoire de l'opérateur est supérieure au débit assuré par la ventilation assistée, même un court instant, l'APR peut se trouver en dépression et par suite, les particules peuvent pénétrer via les fuites.

La demande respiratoire pour des porteurs d'APR a été évaluée par différentes équipes. Pour une activité physique moyenne à intense, comme celle retrouvée sur les chantiers de désamiantage, le pic de débit d'air d'inhalation peut dépasser les 300 L.min^{-1} (Holmer *et al.* 2007, Kaufmann et Hastings 2005, Berndtsson 2004, Howie *et al.* 1996). L'étude de Berndtsson montre que pour un

groupe soumis à un exercice correspondant à une puissance de 150 W (effort important), le pic de débit d'air d'inhalation dépassait 160 litres /min pour plus de 80% des individus et plus de 360 L.min⁻¹ pour 5% des individus. L'étude de Martin et al (2004), montre également que, pour un masque complet à ventilation assistée, un débit de 160 L.min⁻¹ peut être insuffisant.

Ces études soulignent la nécessité de réviser les conditions d'essais normalisés de manière à ce que les APR soient testés à des débits d'air plus importants qu'aujourd'hui (95 L.min⁻¹ actuellement dans les normes européennes).

La fuite au visage reste donc un critère à ne pas négliger dans l'efficacité de tout APR comprenant une pièce faciale hermétique.

Le paragraphe 11.1.4 présente l'influence des principaux facteurs sur la fuite vers l'intérieur.

11.1.2.3 Fuite totale vers l'intérieur

La fuite totale vers l'intérieur, englobant toutes les sources possibles de fuite (au visage, pénétration du filtre, valves, etc...), représente alors le meilleur estimateur du degré de protection offert par l'APR.

Elle peut être estimée en laboratoire sur des sujets d'essai, comme par exemple lors des essais normalisés selon la norme NF EN 12942. Elle peut également être déterminée sur le terrain, par des mesures simultanées à l'intérieur et à l'extérieur de l'APR, en situation réelle ou simulée de travail, et servir à établir des facteurs de protection.

La littérature compte de nombreuses études visant à établir des facteurs de protection en situation réelle ou simulée (Tannahill *et al.* 1990, Héry *et al.* 1991, Myers *et al.* 1995, 1998a et b, Spear *et al.* 2000, Nelson *et al.* 2001, Cohen *et al.* 2001, Duling *et al.* 2007, pour n'en citer que quelques-unes). Plusieurs auteurs ont effectué une revue de la littérature des facteurs de protection déterminés en situations réelles de manière à dériver des facteurs de protection assignés (Nelson 1996, Nicas et Neuhaus 2004).

Des auteurs ont souligné l'influence de nombreux paramètres sur la détermination des facteurs de protection en milieu de travail et les critères à considérer pour juger de la validité de ces études (Vaughan et Rajan-Sithamparanadarajah 2005, Lee *et al.* 2005, Johnston *et al.* 1992) : positionnement de la sonde de mesure, technique de prélèvement et d'analyse, incertitude globale de mesure des concentrations intérieures et extérieures, précision des mesures à l'intérieur de la pièce faciale, temps de réponse des instruments de mesure, niveaux de concentration, plage de concentrations, limites de quantification, etc...

Des campagnes d'essais comparatifs entre la détermination en laboratoire et sur le terrain ont également été réalisées (Héry *et al.* 1994, Tannahill *et al.* 1990, Akkerdjisk *et al.* 1989, Villa *et al.* 1995) et ont montré que l'efficacité déterminée par des essais normatifs pouvait être largement supérieure à l'efficacité mesurée sur le terrain. C'est pourquoi les facteurs de protection en milieu de travail ou assignés ont été développés afin d'apprécier au mieux le degré de protection réellement apporté par les APR.

Le paragraphe 11.1.5 présente l'influence des principaux facteurs sur la fuite totale vers l'intérieur.

11.1.3 Facteurs d'influence sur l'efficacité de filtration

11.1.3.1 Déterminants de l'efficacité de la filtration des aérosols

Eninger et al (2008b) listent et détaillent, au travers d'une revue de la littérature, l'ensemble des facteurs susceptibles d'influencer les résultats des essais de mesure d'efficacité de filtration (voir Figure 7). Les 4 déterminants principaux de la mesure de l'efficacité de la filtration des aérosols sont :

- Les caractéristiques de l'aérosol
- Les caractéristiques du filtre de l'APR
- Les conditions d'essai
- La méthode de mesure

Les caractéristiques de l'aérosol et les caractéristiques du filtre et de l'APR affectent directement l'efficacité de filtration ; Quant aux conditions d'essai et à la méthode de mesure, elles influencent plutôt la mesure de cette efficacité.

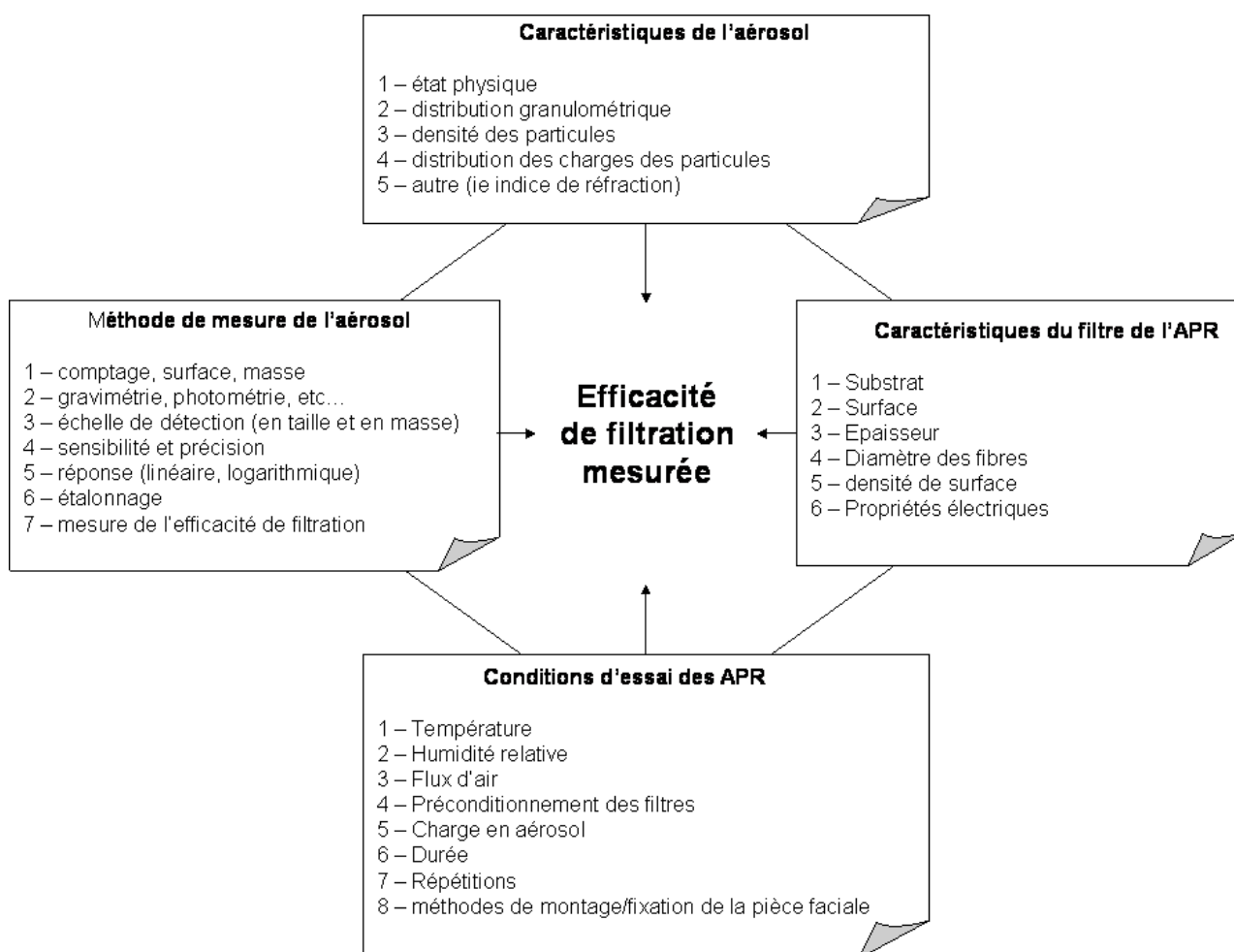


Figure 7 : Facteurs influençant les résultats des essais sur les filtres des APR (Eninger et al. 2008b)

11.1.3.1.1 Caractéristiques de l'aérosol

Distribution granulométrique : MPPS

Selon la théorie de la filtration, il existe un minimum de taille de particules pour laquelle l'efficacité est minimale : ce sont les MPPS. (Lee et Liu 1982, Hinds 1999). De nombreux auteurs ont vérifié cette théorie par la pratique (Lee et Liu 1981, Alderman *et al.* 2008). On peut notamment relever des études récentes sur la filtration des nanoparticules (Eninger *et al.* 2008, Rengasamy *et al.* 2008, Rengasamy *et al.* 2009, Schaffer et Rengasamy 2009).

La taille des particules les plus pénétrantes (MPPS) pour un filtre donné est déterminée par de nombreux facteurs incluant : le débit d'air, la densité de charge des fibres et la distribution de charge des particules de l'aérosol (Eninger *et al.* 2008b, Stevens et Moyer 1989, Martin et Moyer 2000, Esbaugh *et al.* 2009).

La taille des particules les plus pénétrantes peut donc varier d'un filtre à un autre, notamment entre un filtre mécanique et un filtre électret : la taille des particules les plus pénétrantes pour les filtres mécaniques est supérieure à la taille des particules les plus pénétrantes pour les filtres électret (Eninger *et al.* 2008b, Balazy *et al.* 2006).

Forme des particules :

La théorie de la filtration s'applique à des particules sphériques, et si de nombreux auteurs ont modélisé ce phénomène (Cheng *et al.* 1990, Lee et Liu 1982) ou déterminé expérimentalement la taille des particules pour lesquelles la pénétration du filtre est maximale, on retrouve peu d'études visant à caractériser l'influence de la forme des particules (par exemple particules fibreuses).

Asgharian et Cheng (2002) ont modélisé la filtration d'aérosols sphériques et d'aérosols fibreux par des filtres à fibres. Les principaux résultats de leur étude sont les suivants :

- le dépôt des particules fibreuses dépend fortement de l'orientation des particules fibreuses dans l'air. A l'approche du filtre, les particules tendent à s'aligner dans la direction du flux d'air.
- le transport et le dépôt des fibres dépendent du nombre de Stokes⁹, du ratio longueur sur diamètre et du ratio diamètre de fibres sur le diamètre des fibres constituant le filtre.
- l'efficacité de filtration des particules fibreuses est supérieure à l'efficacité de filtration des particules sphériques.

D'autres auteurs se sont attachés à étudier la filtration des aérosols fibreux. Ces études sont détaillées au paragraphe 12.1.

Elles mettent en évidence que les performances des filtres sont supérieures lorsqu'ils sont exposés à des aérosols fibreux par comparaison à une exposition à des aérosols sphériques ou de NaCl.

Densité de charge :

Un autre facteur influençant la filtration des particules est la distribution des charges de l'aérosol. Un aérosol porteur de charges électrostatiques sera mieux filtré qu'un aérosol neutre du fait de l'attraction électrostatique (Eninger *et al.* 2008, Chen et Huang 1998, Hinds 1999). Par ailleurs, la MPPS augmente quand la charge des particules augmente (Chen et Huang 1998). Il est à noter que les aérosols d'amiante étant électriquement chargés (Vincent *et al.* 1981), des conditions d'essais avec un aérosol neutralisé sont plus contraignantes.

⁹ Le nombre de Stokes correspond au rapport de l'énergie cinétique par le travail de la force de traînée de la particule.

11.1.3.1.2 Caractéristiques du filtre

Brown (2001) explicite les principes de la filtration en hygiène industrielle et décrit les effets de divers paramètres sur les performances des filtres (voir Tableau 11).

Tableau 11 : Effets de divers paramètres sur les performances des filtres (issu de Brown, 2001)

Propriété	Effet sur la perte de charge	Effet sur l'efficacité
Finesse des fibres du média filtrant	Négatif	Positif
Tissage plus serré des fibres du filtre (compression de l'emballage)	Négatif	Positif
Epaisseur du filtre	Négatif	Positif
Charge des fibres du filtre	Aucun	Positif
Vitesse d'air basse	Positif	Positif
Taille des particules	Aucun	Il existe une taille la plus pénétrante
Charge des particules	Aucun	Positif

La pénétration des filtres d'APR peut être différente sur certaines parties du filtre, tout en respectant les exigences au regard de la pénétration globale. Huang et al (1998) ont étudié la variabilité spatiale de la pénétration de filtres d'APR N95 et ont montré que localement le taux de pénétration pouvait être supérieur à 5%, valeur requise pour la certification, alors que globalement la pénétration moyenne de l'aérosol est largement inférieure au seuil des 5%.

Filtre électrostatique – Filtre mécanique :

Les filtres à électret sont composés de fibres chargées de manière permanente. Ils offrent une efficacité de collecte élevée tout en induisant une faible perte de charge.

Les filtres mécaniques et les filtres électrostatiques présentent des performances différentes.

Huang et al (2007) ont étudié la pénétration de particules de diamètre de 4,5 nm à 10 µm au travers de filtres électret et mécaniques. Les deux types de filtres n'ont pas les mêmes performances vis à vis de ces nanoparticules : les auteurs ont démontré que la pénétration diminue de 18,9% à 5,8% lorsque les forces électrostatiques entrent en jeu.

La capture électrostatique des particules est plus efficace quand l'air traverse le filtre à faible vitesse car le processus électrostatique dispose de plus de temps pour agir (Brown 2001). Les particules les plus pénétrantes pour les filtres électret sont de taille inférieure (< 100nm) à celle des particules les plus pénétrantes pour les filtres mécaniques (entre 50 et 500 nm (Hinds, 1999)) (Eninger et al. 2008b, Balazy et al. 2006, Huang et al. 2007).

Colmatage :

Le phénomène de colmatage tend à améliorer les performances des média filtrant mécaniques. Dans le cas d'un média filtrant électrostatique, les aérosols piégés par le filtre peuvent neutraliser les charges du filtre dans une certaine mesure et si le phénomène de colmatage ne se produit pas

simultanément, cela peut conduire à une baisse de l'efficacité du filtre (Brown 2001, Martin et Moyer 2000, Martin *et al.* 2006).

Plus le filtre se colmate, plus la taille des particules les plus pénétrantes diminue (Alderman *et al.* 2008).

11.1.3.1.3 Conditions d'essai des APR

Parmi les conditions d'essai pouvant influencer l'efficacité des APR, l'effet du débit d'air et du mode de respiration a été largement étudié.

L'efficacité des filtres décroît (c'est-à-dire la pénétration augmente) lorsque le débit d'air augmente (Esbaugh *et al.* 2009, Holmer *et al.* 2007).

La mesure de la pénétration d'un filtre avec un débit constant d'air pourrait ne pas être précisément prédictive de l'efficacité des filtres dans des conditions réelles de respiration pulsatile ou cyclique : les pénétrations à débit cyclique seraient plus importantes qu'à débit constant (Grinshpun *et al.* 2009, Esbaugh *et al.* 2009) mais Haruta *et al.* (2009) montrent que ce phénomène n'est pas valable pour les fortes valeurs de débit. Ils ont étudié la pénétration de particules ultrafines ($< 100\text{nm}$) en fonction de différents débits d'air : 15 à $135\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, à débit constant et à débit cyclique équivalent. Jusqu'à $85\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, la pénétration est plus importante lorsque le débit est cyclique mais à $135\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ l'inverse se produit. Les auteurs attribuent ce phénomène à la complexité des interactions entre les différents mécanismes de filtration.

D'autres auteurs ont mis en évidence qu'une augmentation de la vitesse de l'air conduit à une diminution des MPPS (Lee et Liu, 1982, Alderman *et al.* 2008, Huang *et al.* 2007).

11.1.3.1.4 Méthode de mesure

La mesure de l'efficacité repose sur des mesures de concentration en particules à l'intérieur de l'APR (ou en aval du filtre) et à l'extérieur de l'APR (ou en amont du filtre).

Les mesures de concentration en particules peuvent être exprimées sous deux formes : concentration pondérale ou concentration en nombre.

Les deux méthodes les plus couramment utilisées sont la photométrie de flamme et le comptage de particules (optique ou par noyau de condensation). La photométrie est requise pour les essais de certification des APR et le comptage de particules pour les essais de pénétration des filtres à haute, très haute efficacité.

Les mesures par gravimétrie, bien que très simples à mettre en œuvre, sont très peu utilisées du fait de leur limite de détection trop élevée. Par ailleurs, la gravimétrie ne fournirait que peu d'information sur les fines et petites particules car celles-ci, même si elles sont nombreuses, contribuent peu à la concentration massique totale.

Le photomètre semble donner un poids plus important aux particules de diamètre $>1\mu\text{m}$ par rapport au compteur à noyau de condensation (Rousseau 2007, Eninger *et al.* 2008b).

Dans l'étude menée par Eninger *et al.* (2008b), l'aérosol de NaCl généré est identique à l'aérosol utilisé pour les essais de certification du NIOSH (diamètre médian en nombre = $0,075 \pm 0,020\mu\text{m}$, écart type géométrique $\leq 1,86$). Les particules de taille inférieure à 100 nm constituent 68% de l'aérosol d'essai en nombre et environ 8% en masse. L'analyse effectuée par Eninger *et al.* (2008b) les conduit à conclure que les essais de certification du NIOSH ne permettent pas de mesurer la pénétration des particules de taille nanométrique ($<100\text{nm}$) au travers du filtre. Eninger *et al.* concluent qu'en terme de scénario le plus défavorable, le compteur de particules est préférable.

Les essais de certification européens mettent en œuvre un aérosol de NaCl polydispersé de caractéristique différente. Mais, la même réflexion peut être menée puisque dans cet aérosol, les particules de taille inférieure à 100 nm constituent 70% de l'aérosol d'essai en nombre et environ 2% en masse (Figure 8)

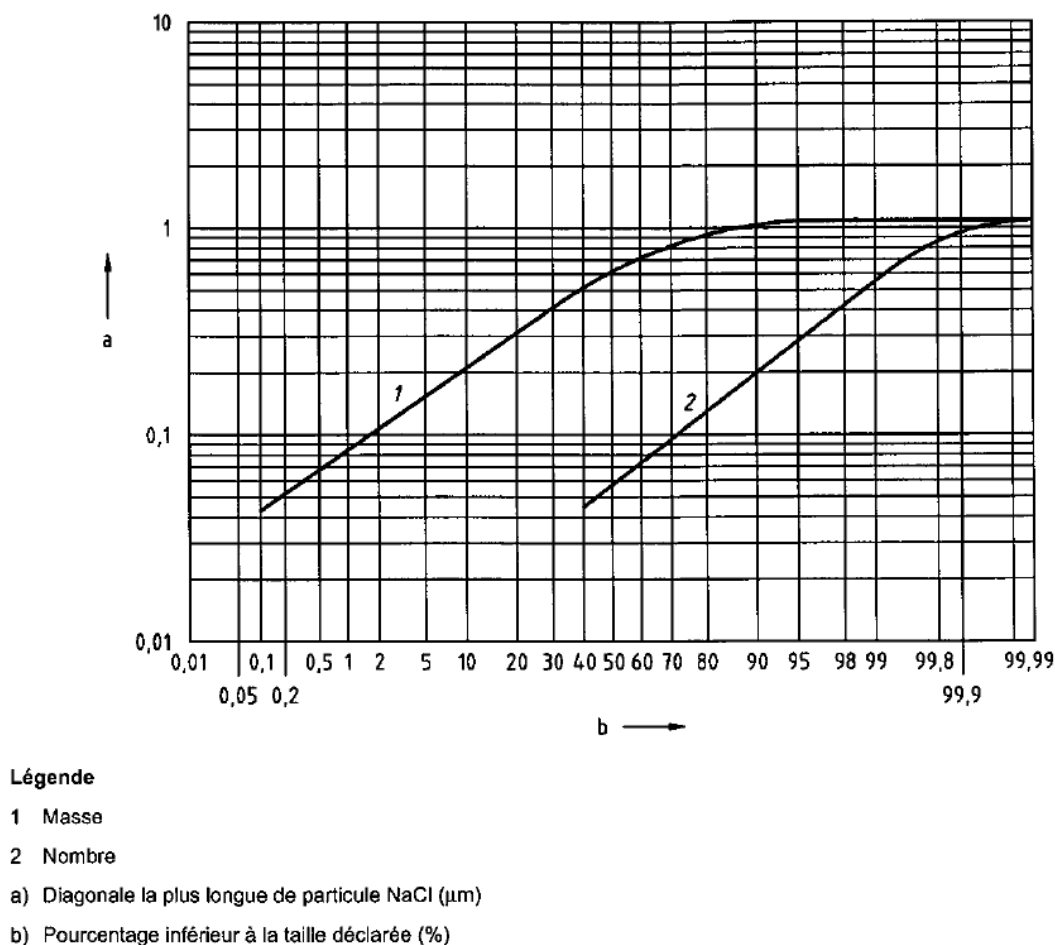


Figure 8 : Répartition granulométrique de l'aérosol de chlorure de sodium selon EN 143 (issu NF EN 143)

Balazy *et al.* (2006) soulignent également que les particules les plus fines étant susceptibles de traverser le filtre lorsque des débits d'air très importants sont atteints en situation de travail, cette pénétration devrait être mesurée en nombre de particules plutôt qu'en masse.

Le comptage de particules semble donc être préférable, tout au moins pour des particules de taille < 100nm et dans des conditions de débit d'air élevé.

Une limitation à ce type de comptage, dans le cas de mesures sur le terrain, pourrait être que les particules analysées doivent avoir une forme et un indice de réfraction proche de celles utilisées pour l'étalonnage (Bémer, 1997).

11.1.4 Facteurs d'influence sur la fuite vers l'intérieur

L'efficacité de protection des APR ne dépend pas seulement des filtres mais également des fuites pouvant se produire, notamment au visage. L'objectif étant de comprendre l'influence de certains facteurs sur cette fuite, afin de prévoir si les fibres d'amiante peuvent se comporter différemment des autres aérosols, les facteurs d'influence sur la fuite vers l'intérieur ont été recherchés. Il est à noter que selon la pièce faciale et le type d'APR la fuite vers l'intérieur peut être plus ou moins importante du fait de l'ajustement de la pièce faciale au visage.

Débit respiratoire et taille des particules :

Cho *et al.* (2009) ont étudié l'influence de la taille des particules et du débit respiratoire sur la fuite au visage pour des pièces faciales filtrantes de type N95 (l'équivalent européen sont les pièces faciales de classe FFP2) positionnées sur un mannequin, à débit constant. La fuite au visage est influencée par le débit respiratoire : pour une taille de particule donnée, plus le débit respiratoire est élevé, moins la fuite au visage est importante, au profit de la pénétration du filtre. Ils montrent également que pour un débit d'air donné, plus la taille des particules est élevée, moins la fuite au visage est importante (tailles de particules étudiées : 0,7 à 5 µm).

Grinshpun *et al.* (2009) confirment cette tendance sur des pièces faciales filtrantes de type N95 avec des particules de taille de 0,03 à 1 µm dans une étude réalisée sur mannequin/machine à respirer et sur sujet humain (la fuite au visage est dans ce cas déterminée comme la soustraction de la fuite totale et de la pénétration du filtre). Ils montrent également que les mouvements de la tête ont une plus grande influence sur la fuite au visage que des inspirations profondes et que ces dernières réduisent la fuite au visage comparativement à une respiration normale.

Chen *et al.* (1990) ont étudié la fuite au visage en simulant cette fuite en perçant des trous de dimension connue dans les pièces faciales filtrantes de type « dust mist » (cette classification américaine n'existe plus aujourd'hui. L'équivalent de ces pièces faciales filtrantes est au minimum un type N95). La pénétration de particules de NaCl de 0,8 à 4 µm est étudiée pour des débits respiratoires constants de 5 à 95 L.min⁻¹. La fuite au visage décroît quand le débit respiratoire augmente. Ils ont également montré que pour des dimensions fixes de fuite le ratio fuite au visage / pénétration du filtre diminue quand le débit respiratoire augmente, et que ce ratio, pour un débit donné, augmente avec la taille des particules. Donc, plus les particules sont grosses et plus elles sont susceptibles de pénétrer par le défaut d'ajustement de la pièce faciale au visage et plus le débit est élevé, plus ce phénomène est accentué.

Il est à noter que cette étude a été menée sur des fuites de taille fixe et connue. Dans la réalité, la fuite au visage est susceptible d'évoluer en fonction de l'activité (Martin *et al.* 2004, Grinshpun *et al.* 2009).

Les particules les plus fines sont donc moins susceptibles de passer par la fuite au visage que par le filtre (Chen *et al.* 1990, Howie *et al.* 1996).

Nelson et Colton (2000) ont montré qu'une augmentation de la résistance respiratoire s'accompagnait d'une augmentation du taux de fuite au visage (essais réalisés sur des APR équipés de filtres HEPA, il n'est pas précisé dans l'étude s'il s'agit de ½ maques ou de masques complets).

Méthode d'évaluation :

La détermination de la concentration en particules à l'intérieur de la pièce faciale et à l'extérieur fait appel aux mêmes techniques que pour la mesure de la pénétration : photomètre de flamme ou compteur de particules. Les remarques émises précédemment (Cf. § 11.1.3.1.4) sur les deux techniques sont également valables dans le cas de la fuite au visage.

La détermination de la fuite au visage peut être effectuée dans diverses conditions (laboratoire et terrain) et de différentes manières :

- En laboratoire :
 - à l'aide d'une tête factice de Sheffield avec un simulateur de filtre, avec un compteur de particules ou bien par photométrie de flamme
- Sur le terrain :
 - par soustraction de la mesure de la fuite totale vers l'intérieur et de la mesure de la pénétration du filtre ;
 - par mesure du facteur d'étanchéité d'ajustage (Cf. plus bas).

Rousseau *et al.* (2007) ont publié une étude visant à proposer la méthode d'évaluation de la fuite faciale des masques respiratoires la plus appropriée. Cette étude compare une méthode de détermination en laboratoire sur mannequin relié à une machine à respirer. Ils ont étudiés 7 masques complets constitués de pièces faciales en matériau souple de type EPDM ou silicone et 4 ½ masques.

Les variations de fuite en fonction du débit ventilatoire déterminées par le photomètre de flamme et le compteur à noyau de condensation sont inversées. Les auteurs suggèrent ainsi que le compteur à noyau de condensation étant plus sensible que le photomètre de flamme aux particules de petite taille, il serait l'instrument le plus adapté pour détecter une fuite faciale pour des débits ventilatoires élevés.

Facteurs humains

Parmi les facteurs humains pouvant influencer l'efficacité des appareils de protection respiratoire, 3 facteurs ont été identifiés comme étant les plus critiques (Howie *et al.* 1996) : la morphologie du visage, l'activité et la transpiration.

La morphologie du visage du porteur est un paramètre critique pour toutes les pièces faciales nécessitant une étanchéité au visage. La pièce faciale doit s'adapter au visage du porteur. Ce paramètre est pris en compte dans les essais normatifs. Les essais doivent en effet être réalisés sur des porteurs ayant des caractéristiques morphologiques de visage différentes (le visage des sujets d'essai est décrit au moyen de 4 dimensions).

Par ailleurs, le port de la barbe est également un facteur important qui diminue l'efficacité de protection en limitant l'étanchéité de la pièce faciale sur le visage (EN 529 : 2006, Oestenstad et Bartolucci 2010).

L'étanchéité d'ajustage peut être déterminée à l'aide de méthodes qualitatives ou quantitatives (EN529, OSHA 2006). Les méthodes qualitatives reposent sur le principe de détection des fuites par un agent d'essai doté d'un goût ou d'une odeur particulière.

Les méthodes quantitatives permettent de déterminer un facteur d'ajustage qui est propre au porteur et qui ne doit pas être confondu avec un facteur de protection déterminé à partir de plusieurs sujets (EN 529). Ce facteur d'ajustage peut être déterminé :

- dans une enceinte d'essai selon le même principe que la détermination de la fuite totale vers l'intérieur,
- sur le terrain à l'aide d'un compteur à particules qui mesurera le nombre de particules à l'intérieur et à l'extérieur de la pièce faciale,
- sur le terrain, à l'aide d'un appareil générant et maintenant une pression constante négative à l'intérieur de la pièce faciale. La quantité d'air évacuée pour maintenir cette pression négative constante donne une indication du débit d'air entrant dans la pièce faciale.

L'INRS mène actuellement une étude à ce sujet, visant à valider les méthodes de terrain pour évaluer l'étanchéité d'ajustage des masques respiratoires (étude A.7/1.047, www.inrs.fr).

Il est à noter que les méthodes d'essai de vérification d'ajustage sont réglementaires aux USA (OSHA, 2010) mais que la procédure de certification repose uniquement sur les performances des filtres et que la fuite totale vers l'intérieur n'est pas prise en compte. La vérification doit être effectuée annuellement. Par ailleurs, l'utilisateur est tenu d'effectuer une vérification d'étanchéité au visage à chaque fois qu'il doit porter un APR.

L'essai d'ajustage est aussi très utile en matière de formation. Il permet de montrer en temps réel l'influence d'un mauvais serrage, d'une forme de masque inadapté à la forme d'un visage, de la présence de cheveux ou de barbe sur les joints du masque, etc...

L'importance du facteur d'ajustage dans la protection offerte par les APR a été largement étudiée essentiellement sur les pièces faciales filtrantes de type N95 et les ½ masques (Zhuang *et al.* 2003, Coffey *et al.* 1999, Coffey *et al.* 2002, Clayton et Vaughan 2005). Ces études soulignent l'amélioration significative apportée par une vérification de l'ajustage à la fuite vers l'intérieur.

L'activité intervient dans l'efficacité de plusieurs manières : une augmentation du débit respiratoire peut conduire à une diminution de la fuite au visage comme cité plus-haut mais les mouvements de la tête peuvent également entraîner des mouvements de l'APR et ainsi modifier l'étanchéité au niveau du visage (Martin *et al.* 2004, Grinsphun *et al.* 2009).

Il est à noter que les pays anglo-saxons requièrent la mise en place d'un programme de protection respiratoire dès lors que le port d'un APR s'avère indispensable (OSHA 2006, HSE 2005).

Au niveau européen, la norme NF EN 529 introduit cette notion de programme de protection respiratoire et en précise les éléments :

- Appréciation et identification des phénomènes dangereux
- Évaluation des risques afin de satisfaire aux exigences légales
- Sélection des appareils adéquats et appropriés
- Formation des utilisateurs et des autres personnes impliquées dans le programme
- Maintenance des appareils conformément aux instructions du fabricant
- Archivage comprenant la politique du programme, les systèmes de gestion mettant en œuvre le programme et l'évaluation des risques
- Audit du programme
- Systèmes de gestion visant à la mise en œuvre du programme.

Il est à souligner que, dans la mesure où cette norme n'entre dans le champ de la conception mais constitue un guide de recommandations pour le choix, l'utilisation, l'entretien et la maintenance, elle ne pourra pas disposer d'un statut de norme harmonisée au titre de la directive 89/686/CEE.

11.1.5 Facteurs d'influence sur la fuite totale vers l'intérieur

La fuite totale vers l'intérieur étant essentiellement une résultante des deux paramètres décrits précédemment (la pénétration et la fuite au visage), les facteurs d'influence sont ceux déjà détaillés, avec une prépondérance pour les facteurs agissant sur la fuite au visage puisqu'il s'agit de la composante principale à la fuite totale.

Héry *et al.* (1994) dans une étude visant à mesurer l'efficacité sur le terrain de ½ masque filtrant P2 dans une usine de production de chromate indiquent que la fuite totale vers l'intérieur diminue quand la concentration augmente, ce qui revient à dire que l'efficacité augmente quand la concentration augmente. Néanmoins, le peu de données disponibles ne permet pas de valider cette tendance observée.

Howie *et al.* (1996) ont observé sur des mesures de facteurs de protection en situation réelle dans les chantiers de désamiantage, une tendance similaire. Néanmoins, le HSE a publié en 2000 un rapport visant à étudier les facteurs d'influence des performances d'appareil de protection respiratoire à ventilation assistée avec masque complet, en situation réelle d'utilisation (Johnston *et al.* 2000) dans lequel les données de Howie *et al.* (1996) sont réanalysées. Les auteurs montrent que l'apparente corrélation entre la concentration ambiante en fibres d'amiante et le facteur de protection est due à des artéfacts du traitement statistique des données (corrélation entre deux variables non indépendantes et non traitement des données pour lesquelles la concentration à l'intérieur du masque était trop faible).

Il semble donc difficile, sur la base de si peu de données, de conclure à une corrélation entre la concentration en fibre d'amiante et la concentration à l'intérieur des APR.

Martin *et al.* (2004), dans une étude visant à mettre au point des essais de laboratoire permettant de refléter au mieux les performances des APR, mesurent entre autre la fuite totale vers l'intérieur sur 4 modèles de masques portés par des sujets d'essai dans différentes conditions. Pour les masques à pression négative et les demi-masques : le niveau de fuite augmente lorsque le débit respiratoire diminue. Cette étude montre également pour les APR dotés d'une ventilation assistée que la fuite vers l'intérieur en activité simulée (montée et descente d'une marche, marche à 6km.h⁻¹ et grattage d'une surface à 2m de hauteur) est dépendante de l'activité et supérieure à celle déterminée par les essais normalisés.

Méthode de détermination :

Hormis la technique de mesure de la concentration dont les avantages et inconvénients ont été évoqués plus haut, la principale difficulté dans la mesure de la fuite totale vers l'intérieur sur le terrain consiste à l'échantillonnage à l'intérieur de la pièce faciale.

Myers *et al.* (1986, 1988 Myers 1986, et 1988a et b) exposent les différentes causes conduisant à un biais dans l'échantillonnage, comme par exemple le positionnement de la sonde de prélèvement.

Du fait de la faible concentration à l'intérieur des APR, la plupart des auteurs ayant à effectuer des mesures de concentration en fibres d'amiante ont eu à modifier le dispositif de prélèvement ainsi que les conditions de prélèvement et d'analyse afin d'augmenter la sensibilité de la mesure. Le dispositif de prélèvement a également été modifié afin de ne pas gêner le porteur (Howie *et al.* 1996, Tannahill *et al.* 1990, INRS, 1998).

Par ailleurs, la modification d'un APR pour faire passer un dispositif de prélèvement, peut entraîner une fuite supplémentaire pour le porteur et une attention particulière doit être apportée afin d'éviter d'exposer le porteur à une atmosphère potentiellement dangereuse.

Johnston *et al.* (2000) ont réalisé des essais de performance d'APR à ventilation assistée avec masque complet en situation de travail simulée, dans une atmosphère de chlorure de sodium et a comparé les résultats avec ceux obtenus avec des essais normalisés selon la norme EN 147 (remplacée aujourd'hui par la norme EN 12942). Ils ont utilisé un système vidéo pour visualiser l'activité du porteur et enregistrer simultanément la fuite à l'intérieur du masque. Cette étude a montré que les masques offraient de meilleures performances dans les situations de travail simulées que lors des essais de fuite vers l'intérieur normalisés. La température et l'humidité n'ont pas eu d'influence sur les performances des masques. Seul le fait de bouger la tête et de parler a conduit à une chute significative du facteur de protection. Les fuites sont essentiellement dues à une pression négative à l'intérieur du masque. Les plus importantes sont celles au visage et à travers la valve d'expiration plutôt que celles à travers le filtre.

11.1.6 Évaluation de l'efficacité vis-à-vis de l'amiante

L'objectif de cette partie est de recenser les données disponibles dans la littérature sur l'efficacité de protection des EPI vis-à-vis de l'amiante, de manière à analyser si la protection offerte est suffisante ou bien si des études complémentaires sont nécessaires.

La recherche bibliographique a porté sur les vêtements de protection, les appareils de protection respiratoires et les filtres, et sur des études en situation réelle de travail, ou bien en situation simulée ou encore en laboratoire.

Différentes études visant à établir des facteurs de protection en milieu de travail pour des appareils de protection respiratoire dans les chantiers de désamiantage ont été réalisées. Il est à noter qu'elles sont relativement anciennes et que toutes mettent en œuvre le comptage des fibres par Microscopie Optique à Contraste de Phase (MOCP).

Cuendet et Bilat (1984) ont mesuré la concentration à l'intérieur d'un masque de protection respiratoire et à l'extérieur sur 3 porteurs lors d'opération d'arrachage à sec de flocage. Les

prélèvements ont été effectués à 2 L.min^{-1} pendant 2h environ sur des filtres de diamètre 37mm, de porosité $0,8\mu\text{m}$. Le comptage est effectué par MOCP : les fibres dénombrées ont une longueur $> 5 \mu\text{m}$, un diamètre $< 3 \mu\text{m}$ et un rapport L/D de 3. Les concentrations à l'intérieur du masque correspondent à 0,4 – 5% des concentrations à l'extérieur, conduisant à un facteur de protection de 20 à 250. Les concentrations extérieures étaient de 0,43 à $1,65 \text{ fibres.mL}^{-1}$.

Akkersdijk et al (1989) ont mesuré la concentration à l'intérieur d'un heaume ventilé, lors de deux opérations de retrait de calorifugeage en amiante. Le matériau contenait de l'amosite, du chrysotile et de la crocidolite. Les mesures ont été effectuées en MOCP. Un facteur de protection de 350 a été évalué. La concentration à l'extérieur du heaume était pour la première opération de $28 \text{ fibres.cm}^{-3}$ et pour la seconde de 5 fibres.cm^{-3} . Il est à noter que les prélèvements à l'intérieur du heaume ont duré 170 à 182 min pour la 1^{ère} opération contre 10-11min pour les mesures à l'extérieur du heaume et 94-131 min à l'intérieur pour la 2^{ème} opération contre 8-11 min pour les mesures à l'extérieur.

Tannahill et al (1990) ont déterminé les facteurs de protection pour 3 modèles d'APR avec masque complet à pression négative, pendant des opérations d'enlèvement d'amiante.

Les mesures à l'intérieur du masque ont été effectuées à l'aide de filtre de diamètre 13 mm, de porosité de $1,2 \mu\text{m}$ à un débit de 2 L.min^{-1} . Les prélèvements à l'extérieur du masque ont été effectués avec un filtre de diamètre 25 mm, de porosité $0,8\mu\text{m}$, à un débit de $0,5 \text{ L.min}^{-1}$. La durée des prélèvements intérieurs et extérieurs était identique. Les fibres ont été comptabilisées par MOCP.

Les facteurs de protection déterminés varient de 11 à 2090 pour le premier modèle, de 26 à 3493 pour le 2^{ème} modèle et de 17 à 500 pour le 3^{ème} modèle. Le 5^{ème} percentile pour chacun des 3 APR est respectivement de 19, 41, 11.

Les auteurs constatent que les facteurs de protection augmentent avec la concentration et explicitent cette observation par le fait que les opérateurs se sachant plus exposés sont plus attentifs à leur façon de travailler et de porter les équipements de protection.

Howie et al (1996) ont mené une étude afin de déterminer des facteurs de protection de 4 APR lors d'opérations de retrait d'amiante sur 8 sites. Au total, 179 ratio « concentration extérieure de l'APR / concentration intérieure de l'APR » ont été établis, dont 57 étaient quantifiables. Ils ont déterminé un FPA de 40 pour les APR à ventilation assistée à pression positive. Les mesures ont été réalisées en MOCP (fibres de longueur $> 5\mu\text{m}$, diamètre inférieur à $3\mu\text{m}$, rapport L/D >3).

Ils ont également observé que parmi les facteurs humains pouvant affecter le facteur de protection, 3 facteurs humains étaient primordiaux : les dimensions faciales, l'activité et la transpiration.

Les auteurs soulignent par ailleurs une possible corrélation entre la concentration ambiante et la concentration à l'intérieur du masque. Cependant, Johnston *et al.* (2000) ont réévalué le traitement des données de l'étude de Howie *et al.* et ont conclu à l'absence de corrélation : la tendance observée par Howie *et al.* est due à des artefacts de traitement statistique des données.

Villa *et al.* (1995) ont mené une étude visant à mesurer le facteur de protection en situation de travail d'un masque complet à ventilation assistée avec 4 blocs moteur lors d'opérations d'enlèvement d'amiante. Les cartouches filtrantes de type P3 étaient changées quotidiennement. L'air a été échantillonné à l'intérieur et à l'extérieur simultanément pendant 3 à 6h. Plusieurs filtres de prélèvement à l'extérieur ont été nécessaires pour un filtre échantillonné à l'intérieur. L'air à l'intérieur a été échantillonné au niveau du front.

Le comptage des fibres d'amiante a été réalisé par MOCP : fibres de longueur $> 5\mu\text{m}$, de diamètre $< 3\mu\text{m}$, de rapport L/D ≥ 3 .

Seul un des blocs moteurs a pu être correctement testé, les autres ayant été écartés pour des raisons diverses telles que débit insuffisant, décontamination par voie humide impossible ou trop contraignante.

Les essais réalisés ont conduit à des facteurs de protection de 400 à 10000 mais il est à noter que si à l'époque les concentrations mesurées à l'intérieur du masque étaient inférieures aux VLEP en vigueur ($0,6 \text{ fibres.cm}^{-3}$ pour le chrysotile et $0,3 \text{ fibres.cm}^{-3}$ pour les autres variétés d'amiante), il n'en serait pas de même aujourd'hui.

L'INRS (1998) a publié une étude visant à évaluer l'efficacité des appareils de protection respiratoire utilisés sur 15 chantiers d'enlèvement d'amiante. Les appareils de protection respiratoire utilisés étaient de type ventilation assistée et adduction d'air comprimé.

Hormis pour un cas où était utilisée une cagoule, l'échantillonnage à l'intérieur de la pièce faciale a été effectué à l'aide d'une sonde traversant la pièce faciale, reliée à une cassette fermée de diamètre 25mm munie d'une membrane en ester de cellulose. Ce type de prélèvement a nécessité un traitement particulier de la membrane pour s'affranchir d'une répartition hétérogène des fibres (découpage en 2, calcination, récupération des fibres, comptage par MOCP). L'échantillonnage a duré de 1h à 2h30.

L'échantillonnage à l'extérieur du masque est réalisé en cassette ouverte pendant quelques minutes seulement, compte tenu de l'empoussièrement élevé. Le comptage des fibres a été réalisé en lecture directe par MOCP.

Les facteurs de protection pour l'adduction d'air qui ont été déterminés (500 à 100000) sont supérieurs à ceux déterminés pour la ventilation assistée (50 à 10000), mais les auteurs soulignent que la ventilation assistée peut se révéler plus adaptée pour certaines opérations, notamment celles nécessitant de se brancher et débrancher fréquemment de l'air comprimé.

Au total 28 dépassements de VLEP en vigueur au moment de l'étude ($0,1 \text{ fibre.mL}^{-1}$) sur 125 mesures ont été dénombrés.

Il est à noter qu'au regard de la VLEP pour l'amiante la plus basse actuellement en vigueur ($0,01 \text{ fibre.mL}^{-1}$), au moins 86 dépassements auraient été dénombrés (soit près de 70% des expositions mesurées).

Une étude plus récente a été menée dans l'objectif de déterminer les performances offertes par un appareil de protection respiratoire filtrant à ventilation assistée équipé d'un masque complet muni d'une soupape à la demande à pression positive (modèle SE400AT) lorsqu'il est porté lors d'opérations de retrait de matériaux amiantés (Howie 2001). Cette étude, menée sur 4 sites de retrait de matériaux contenant de l'amosite, montre des concentrations à l'intérieur de l'APR et à l'extérieur de l'APR variant de $0,0014 \text{ fibres.mL}^{-1}$ à $5,8 \text{ fibres.mL}^{-1}$ (nettement inférieures à celles mesurées par l'INRS). Le comptage a également été effectué par MOCP en ne comptant que les fibres OMS. Il est à noter que les fibrilles d'amosite sont plus grosses que les fibrilles de chrysotile.

Howie souligne également la difficulté de réaliser les mesures à l'intérieur et à l'extérieur, notamment le problème de la densité des fibres sur les membranes observées au microscope. Idéalement les densités doivent être identiques mais cela nécessite des adaptations techniques (prélèvement sur cassette de 7mm de diamètre, à des débits très faibles (25 mL.min^{-1})). Les facteurs de protection varient de 2600 à plus de 67000.

11.1.7 Conclusion

La synthèse bibliographique met en évidence que les essais de pénétration du filtre d'un APR dépendent de nombreux paramètres (MPPS, débit ventilatoire, technique d'analyse, etc...).

L'étude des paramètres et facteurs d'influence sur l'efficacité des APR montre que la plupart de ces éléments interagissent et que les phénomènes sont complexes. Les points suivants peuvent néanmoins être soulignés :

- Pénétration du filtre :
 - La taille des particules les plus pénétrantes pour les filtres électrostatiques est inférieure à la taille des particules les plus pénétrantes pour les filtres mécaniques.
 - L'efficacité de filtration des aérosols fibreux est supérieure à l'efficacité de filtration des aérosols sphériques ;
 - L'efficacité de filtration d'un aérosol porteur de charges électrostatiques est supérieure à l'efficacité de filtration d'un aérosol neutre. Il est à noter que les aérosols d'amiante sont des aérosols chargés ;
 - L'efficacité de filtration diminue avec une augmentation de la vitesse ou du débit d'air ;
 - Le phénomène de colmatage améliore les performances de filtration des filtres mécaniques mais peut contribuer à une baisse d'efficacité de filtration des filtres électrostatiques ;
 - Une augmentation de la vitesse de l'air peut conduire à une diminution de la taille des particules les plus pénétrantes.
- Fuite vers l'intérieur :
 - L'efficacité globale est essentiellement dépendante de la fuite au visage. Ceci est d'autant plus vrai que le filtre utilisé présente une efficacité de filtration élevée ;
 - Pour une taille de particules donnée, la fuite vers l'intérieur diminue avec des débits d'air plus élevés (et la pénétration du filtre augmente) ;
 - Pour un débit d'air donné, plus les particules sont grosses et plus elles sont susceptibles de pénétrer par la fuite au visage. Plus le débit est élevé, plus ce phénomène est accentué ;
 - La fuite est plus importante avec les mouvements de la tête du porteur plutôt qu'avec une augmentation du débit ventilatoire ;
 - Plus la résistance respiratoire est élevée, plus la fuite au visage est importante.

Les conditions d'essais normalisés permettent de prendre en compte l'ensemble de ces paramètres. Il est toutefois nécessaire de souligner que :

- certains auteurs recommandent que les essais soient réalisés à des débits ventilatoires plus importants, permettant de mieux simuler le débit respiratoire lors d'une charge de travail intense ;
- les particules les plus petites ne sont pas prises en compte par la technique de mesure par photométrie.

Les particules les plus fines pénétrant au travers du filtre contribuent peu à la masse totale des particules ayant traversé le filtre. Un comptage des particules submicroniques en nombre pourrait être plus approprié pour estimer la protection offerte par les APR et les EPI comme cela est déjà fait pour les filtres à haute efficacité.

Il apparaît clairement que le paramètre prépondérant dans l'efficacité de protection d'un APR est la fuite au visage. Ce paramètre est pris en compte dans les essais normalisés de certification des APR par la détermination de la fuite vers l'intérieur. Néanmoins, cette détermination est effectuée en laboratoire et sur un panel de 10 sujets d'essais, avec si possible des caractéristiques faciales

différentes. Il n'en reste pas moins que sur le terrain, l'ajustement de la pièce faciale doit être déterminé.

Concernant les études de l'efficacité des APR au regard d'une exposition à l'amiante, la disparité des méthodes de prélèvement et des conditions de traitement de filtre avant analyse, rend difficile une comparaison de ces études.

Les facteurs de protection déterminés à partir de mesures à l'intérieur et à l'extérieur réalisées de manière différente (supports de prélèvement, durée de prélèvement, etc...) sont discutables et la question de la représentativité de ces facteurs est soulevée.

La plupart des études recensées font appel à la MOCP pour le comptage des fibres d'amiante et ne fournissent donc aucune information quant aux performances des EPI vis-à-vis des FCA et FFA.

La plupart des expositions mesurées dans ces études dépassent la valeur de concentration d'exposition de 3 fibres.L⁻¹ (correspondant à un excès de risque de mortalité par cancer du poumon ou de mésothéliome de 10⁻⁴) proposée par l'Afsset (Afsset, 2010), même pour les chantiers pour lesquels les auteurs relevaient une excellente maîtrise de la protection.

Ces études étant anciennes, il est fort probable que depuis les équipements de protection aient évolués. De ce fait, même s'il apparaît au vu de ces études que l'exposition des opérateurs pourrait être supérieure aux valeurs limites actuelles les plus basses, il convient de nuancer ce constat. La campagne de mesure actuellement menée par la DGT sur les chantiers de désamiantage devrait apporter des informations utiles quant aux niveaux de concentration ambiante en fibres d'amiante.

11.2 Vêtements de protection

11.2.1 Synthèse bibliographique

Hormis les essais normatifs, dans le cadre de la mise sur le marché qui permettent d'appréhender un niveau de protection dans des conditions maîtrisées, l'efficacité des vêtements de protection contre les particules n'est pas évaluée sur le terrain.

Très peu d'articles traitent des performances des vêtements de protection vis-à-vis des aérosols et encore moins vis-à-vis des fibres d'amiante. La plupart des articles s'intéressent aux contraintes physiologiques et/ou subjectives induites par le port d'une combinaison de protection lors d'opération de retrait d'amiante (Turpin-Legendre et Meyer 2003, Ohnaka *et al.* 1993, Rissanen *et al.* 1991).

Sur les différentes requêtes effectuées, seuls deux articles traitant spécifiquement d'essais visant à caractériser l'efficacité de la barrière d'un vêtement de protection contre les fibres d'amiante ont été recensés (Spurny *et al.* 1990, Hartsy et al. 2000).

Spurny *et al.* (1990) ont mis au point des essais visant à mesurer la pénétration au travers d'un matériau de vêtement de protection, dans l'objectif de fournir des recommandations pour une normalisation de la mesure de l'efficacité des vêtements de protection contre les particules. Deux types d'aérosols ont été générés:

- un aérosol de crocidolite finement dispersé
- un aérosol de fibres de chrysotile contenant en majorité des FCA et une très faible proportion de FFA.

Les fibres sont prélevées à l'aide d'un filtre en polycarbonate en amont et en aval de l'échantillon du matériau à tester placé dans une cellule. Les fibres sont dénombrées et mesurées en

microscopie électronique (à balayage et en transmission). Le traitement des filtres avant analyse n'est pas précisé, ni la fraction de filtre sur laquelle sont effectuées les analyses.

La pénétration et l'efficacité de rétention de 9 matériaux non-tissés différents ont été déterminées, pour différentes vitesses de flux d'air. Les caractéristiques (porosité, perméabilité) de chaque matériau sont précisées.

86 à 100% des fibres fines de chrysotile de longueur supérieure à 5µm et 44 à 96% des fibres de longueur inférieure à 5µm sont retenues par les matériaux testés (autrement dit : 0 à 14% des fibres de longueur >5 µm et 4 à 56% des fibres de longueur < 5µm pénètrent au travers des matériaux testés). Les efficacités de rétention pour les fibres de crocidolite étaient supérieures à celles pour les fibrilles de chrysotile.

L'ensemble des résultats n'est pas présenté dans l'étude. Néanmoins, pour certains matériaux, la distribution granulométrique des fibres a été modifiée par la pénétration au travers du matériau. Par exemple pour un matériau, seules les fibres de longueur < 5µm ont pénétré.

Ainsi, l'évaluation de la pénétration dépend de 3 paramètres principaux :

- la vitesse du flux d'air : non seulement, plus la vitesse est élevée et plus la pénétration des fibres augmente mais aussi la pénétration des fibres les plus longues augmente.
- la distribution granulométrique de l'aérosol d'essai : les fibres les plus fines traversent plus facilement le matériau
- l'homogénéité du matériau constitutif de la combinaison : les auteurs ont observé une variation allant jusqu'à 20% de l'épaisseur et la porosité d'un endroit d'un matériau à un autre. Ils recommandent que la méthode de choix d'un échantillon de matériau soit normalisée de manière à prendre en considération cette hétérogénéité.

Plus récemment, Hartsy et al (2000) ont mené des investigations afin de mesurer la performance de la barrière de divers matériaux de vêtements de protection contre des fibres de chrysotile. Le principe est comparable à l'étude de Spurny par le fait qu'un échantillon de matériau est testé et non pas le vêtement de protection dans son ensemble.

4 matériaux différents ont été testés :

- 1 matériau non tissé de fibres de polyéthylène obtenu par flash-spinning (Tyveck 1431)
- 3 matériaux composite non tissé de fibres de polypropylène extrudées (Kleenguard GP, Kleenguard General Protection, Kleenguard Heavy Duty)

Les essais ont porté sur des éprouvettes de matériau de 45 mm de diamètre.

Un aérosol d'amiante a été généré dans un banc d'essai (concentration en fibres : 150 à 710 fibres.mL⁻¹).

Les prélèvements ont été effectués en aval de chaque éprouvette à l'aide de filtre en polycarbonate de 25 mm de diamètre et de diamètre de pore de 0,2 µm. Deux cassettes comportant un filtre nuclépore de diamètre 25 mm ont permis de prélever l'aérosol dans le banc d'essai.

Les résultats de pénétration sont établis par comparaison entre les filtres situés en aval des éprouvettes et les filtres seuls.

Une portion des filtres est prélevée, recouverte d'un film d'or et analysé par microscopie électronique à balayage. Le comptage est effectué à partir de clichés pris sur plusieurs champs d'observation. Les fibres de ratio L/D > 3 sont comptées.

Les résultats de cette étude indiquent que le matériau Tyvek est plus performant que les matériaux composites de fibres de polypropylène : pénétration de 0,24 à 1% contre 13 à 27%. Il est à noter que l'auteur de la publication appartient à la société de Dupond de Nemours qui fabrique et commercialise le Tyvek.

11.2.2 Conclusion

Seules deux études ont été recensées et ne rapportent que les performances du matériau. Les performances de protection du vêtement dans sa globalité ne sont pas étudiées. Ces études ne permettent donc pas de discuter des essais normalisés pour la certification de ces vêtements. Elles mettent en avant une pénétration possible des fibres d'amiante, parfois importante (56%). Une pénétration exclusivement des fibres courtes d'amiante a été relevée pour un type de matériau.

12 Comparaison de la filtration des fibres d'amiante ou autres particules non sphériques et des aérosols utilisés pour les essais normalisés (MPPS)

Les fibres, de part leur morphologie particulière, ont un comportement aéraulique différent des particules sphériques ou des particules de NaCl utilisées dans les essais de certification.

La synthèse bibliographique a pour objectif de recenser et d'analyser les études comparant l'efficacité mesurée avec un aérosol d'essai normalisé et un aérosol d'amiante. Il est à noter que les études recensées portent uniquement sur la pénétration des filtres et non sur la fuite au visage ou la fuite totale vers l'intérieur.

12.1 Comparaison de la filtration des fibres / aérosols utilisés pour les essais normalisés

12.1.1 Synthèse bibliographique

Six articles comparant le comportement à la filtration de particules sphériques au comportement à la filtration de fibres d'amiante ont été recensés. Certaines études sont expérimentales tandis que les autres étudient le comportement à la filtration au travers de modèles.

12.1.1.1 Etudes expérimentales

Cheng et al. 2006

L'étude la plus récente (Cheng *et al.* 2006) porte sur l'évaluation de filtres d'appareils de protection respiratoire pour les fibres d'amiante.

Il s'agit d'une étude expérimentale consistant à évaluer l'efficacité de 4 types de filtres chargés électriquement vis-à-vis d'un aérosol de particules sphériques (aérosol de DEHS (di-(2-ethylhexyl) sebacate) et vis-à-vis de 3 aérosols d'amiante (chrysotile, amosite, crocidolite). Les effets de la charge surfacique des filtres ainsi que celle de la vitesse du flux d'air ont été investigués.

Les caractéristiques des aérosols générés sont précisées dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Caractéristiques des aérosols générés dans l'étude de Cheng (Cheng *et al.* 2006)

Aérosol	Diamètre aérodynamique médian en masse (μm)	Longueur médiane en nombre (μm)	Diamètre médian en nombre (μm)
DEHS	0,30 μm (écart type = 1,27)	-	-
Amosite	-	1,19 $\pm$ 0,19	0,18 $\pm$ 0,011
Crocidolite	-	0,53 $\pm$ 0,05	0,083 $\pm$ 0,015
Chrysotile	-	0,62 $\pm$ 0,12	0,030 $\pm$ 0,004

Pour mémoire, les caractéristiques dimensionnelles des fibres courtes et fibres fines d'amiante sont les suivantes :

- FFA : $d < 0,2\mu\text{m}$, $L/D > 3$, $L > 5\mu\text{m}$
- FCA : $d < 3\mu\text{m}$, $L/D > 3$, $L < 5\mu\text{m}$

Les prélèvements en fibres d'amiante sont réalisés en amont et en aval du filtre à l'aide d'une membrane de 47mm de diamètre. Les analyses sont réalisées par microscopie électronique en transmission à balayage au grandissement X2000. Le comptage et les mesures des fibres sont réalisés à partir de clichés. Les fibres comptabilisées sont celles pour lesquelles le ratio L/D est supérieur à 3.

Les concentrations en DEHS sont déterminées en amont et en aval du filtre à l'aide d'un photomètre en temps réel RAM-1.

L'ensemble des résultats des essais menés par Cheng est synthétisé dans le Tableau 13.

Si l'on excepte les filtres A (FFP1) et B (N95 ce qui correspond au filtre FFP2 en Europe) qui ne sont pas utilisés dans le domaine de l'amiante en France, il s'avère que pour chacun des filtres étudiés, le chrysotile est mieux arrêté que le DEHS, que le filtre ait été traité ou non, et aux deux vitesses de flux d'air testées (Cf. Tableau 13).

Il n'apparaît pas d'effets de la vitesse de filtration excepté dans le cas du filtre B pour lequel la crocidolite et l'amosite sont moins bien arrêtées à faible vitesse dans les deux configurations de filtre (charges neutralisées ou non). L'auteur suggère que ceci pourrait être dû à des effets d'inertie dans le mécanisme de collecte.

Dans les autres cas, les performances de filtration de chaque filtre sont supérieures avec les aérosols d'amiante par comparaison à l'aérosol de DEHS, excepté pour le filtre HEPA (filtre D), pour lequel les performances de filtration sont identiques (efficacité > 99,99%).

Tableau 13 : Synthèse des résultats obtenus par Cheng (Cheng, 2006)

	Charges du filtre	Vitesse (L.min ⁻¹)	Efficacité de filtration du filtre (%)			
			DEHS	amosite	crocidolite	chrysotile
filtre A (type FFP1)	non neutralisées	32	84,63	94,16	95,85	97,4
	neutralisées	32	43,96	79,94	74,08	76,81
	non neutralisées	85	78,17	-	-	-
	neutralisées	85	34,93	55	29,39	23,5
filtre B (N95)	non neutralisées	16	95,21	91,37	92,57	99,5
	neutralisées	16	94,68	73,16	88,34	95,2
	non neutralisées	42,5	94,45	-	-	-
	neutralisées	42,5	93,92	97,93	96,92	97,99
filtre C (N100)	non neutralisées	32	99,99	99,61	98,93	>99,99
	neutralisées	32	99,99	99,98	>99,99	>99,99
	non neutralisées	85	99,99	-	-	-
	neutralisées	85	99,99	>99,99	>99,99	>99,99

	Charges du filtre	Vitesse (L.min ⁻¹)	Efficacité de filtration du filtre (%)			
			DEHS	amosite	crocidolite	chrysotile
filtre D (HEPA, N100)	non neutralisées	16	>99,99	>99,99	>99,99	>99,99
	neutralisées	16	>99,99	-	-	-
	non neutralisées	42,5	>99,99	>99,99	>99,99	>99,99
	neutralisées	42,5	>99,99	>99,99	>99,99	>99,99

Il est à noter que l'étude ne mentionne pas les concentrations en fibres d'amiante ou en DEHS auxquelles les filtres ont été exposés. Ces concentrations permettraient de relativiser les résultats obtenus par rapport aux concentrations d'exposition réelles ou normatives.

Les essais ont été réalisés avec des particules d'amiante non chargées. Les résultats présentés peuvent être considérés comme le cas le plus défavorable puisqu'un aérosol fibreux contient plus de charges qu'un aérosol sphérique et la charge moyenne d'un aérosol fibreux est proportionnelle à la longueur des fibres (Cheng et Yeh 1983, Han et Gentry 1993).

Brosseau et al., 1990

Brosseau *et al.* (1990) ont évalué la pénétration d'aérosols de silice et d'amiante au travers de 3 filtres d'appareils de protection respiratoire filtrants. Les auteurs ont étudié cette pénétration avec des débits constants (32 L.min⁻¹) ou cycliques (débit sinusoïdal, valeur de pic de 100 L.min⁻¹, période de 2,55s, débit moyen 76 L.min⁻¹ et volume minute de 37 L).

Chaque pièce faciale est fixée de manière étanche sur un appareillage permettant de simuler une respiration.

L'aérosol de silice est tel que le diamètre médian en nombre déterminé par MEB est de 0,46µm (écart type géométrique de 2,5). Le diamètre aérodynamique médian en nombre déterminé avec un impacteur est similaire.

L'aérosol d'amiante est constitué d'amosite. Ce choix a été fait par les auteurs car il représente l'aérosol fibreux le plus défavorable du fait de la forme des fibres. Les auteurs précisent que le chrysotile devrait être filtré plus efficacement du fait de sa morphologie curviligne.

La longueur médiane en nombre est de 4,5µm (écart type géométrique de 2,7) et le diamètre médian en nombre est de 0,2µm (écart type géométrique de 2,5). Ces paramètres ont été déterminés par META.

Les prélèvements de fibres en amont du filtre ont été effectués sur cassette de 47mm et filtre en ester de cellulose de diamètre de pores 0,8µm (débit 100 mL.min⁻¹, pendant 3 fois 30 min).

Les prélèvements de fibres en aval du filtre ont été effectués sur cassette 25 ou 47mm, à un débit de 32 mL.min⁻¹ pendant 90 min.

Une portion de ces filtres est analysée par MOCP. Les concentrations dans la chambre sont de 800 à 1200 fibres.mL⁻¹.

Les deux aérosols ont été neutralisés.

Les résultats montrent que les tests utilisant des aérosols de silice ne sont pas prédictifs des performances des APR soumis à des aérosols d'amiante. La pénétration est maximale sous des conditions de débit cyclique plutôt que constant. L'étude montre également que la pénétration de l'aérosol de silice est supérieure à celle de l'aérosol d'amosite, que le débit soit cyclique ou constant.

Ortiz et al. (1988) :

Ortiz *et al.* (1988) ont mesuré la pénétration d'un aérosol de chrysotile au travers de 5 filtres d'appareils de protection respiratoire. Les essais ont été menés sous diverses conditions :

- Filtre neuf
- Filtres préalablement et brièvement exposés à un aérosol de DEHS
- Filtres préalablement exposés plus longtemps à un aérosol de DEHS.
- Filtres stockés à forte humidité
- Filtres préexposés à un brouillard d'eau.

Le comptage des fibres a été effectué par MOCP selon la méthode du NIOSH. Les fibres OMS ont donc été dénombrées.

Les fibres courtes ont néanmoins été estimées et les auteurs précisent que si les fibres courtes sont intégrées aux résultats, ceux-ci n'en sont pas significativement affectés (différence inférieure à 10%).

La concentration en chrysotile dans l'aérosol d'essai est de 5 à 50 fibres.cm⁻³.

La pénétration des filtres par les aérosols de DEHS est nettement supérieure à la pénétration par l'aérosol de chrysotile (mesuré par MOCP). Une préexposition au DEHS conduit à une diminution de l'efficacité des filtres vis-à-vis de l'amiante, excepté pour le filtre HEPA testé.

Toutes les conditions environnementales d'essai ont eu une influence sur au moins un modèle de filtre, mais il n'est pas possible de généraliser puisque par exemple seul un filtre sur les 5 testés est considérablement affecté par un stockage dans un environnement très humide ou par une préexposition à un brouillard d'eau (augmentation notable de la pénétration des fibres d'amiante).

Weeks et Burns (1970)

Une ancienne étude de Weeks et Burns (1970) examine la filtration d'un aérosol de fibres de chrysotile à travers différents éléments d'APR mais les mesures sont pondérales et ne peuvent donc pas être comparées aux études mettant en œuvre un aérosol de NaCl ou de DEHS. Elles n'apportent aucune information concernant le nombre de fibres courtes ou fines d'amiante.

12.1.1.2 Etudes de modélisation

Asgharian et Cheng (2002)

Asgharian et Cheng (2002) ont étudié de manière théorique l'efficacité de captage des aérosols sphériques et fibreux par des filtres à fibres. Les auteurs n'ont considéré que les phénomènes d'impaction et d'interception. Le phénomène de diffusion n'a pas été étudié. Par hypothèse, les particules fibreuses dans le modèle ne sont pas chargées.

Le modèle montre que la trajectoire et le dépôt des particules fibreuses dépendent fortement de l'orientation des fibres dans le flux d'air. L'effet de la vitesse de cisaillement est de retourner les fibres pour qu'elles s'alignent dans la direction du flux d'air.

Les résultats entre les particules sphériques et fibreuses sont significativement différents. L'efficacité de captage dépend beaucoup du ratio L/D des fibres. L'efficacité augmente quand le ratio augmente, essentiellement parce que la longueur augmente alors que le diamètre reste constant.

Les pertes par interception sont importantes pour les particules sphériques et les particules fibreuses.

Le modèle met en avant une efficacité des filtres à fibres supérieure pour les particules fibreuses à celle pour les particules sphériques.

Brosseau et al. (1993) :

Brosseau *et al.* (1993) ont effectué une comparaison de mesures expérimentales de performance de filtres (pénétration d'aérosol de latex monodispersé et d'aérosol de silice et d'amiante) avec les prévisions d'efficacité d'un modèle basé sur la théorie de la filtration d'une fibre et d'un modèle empirique.

Pour les filtres mécaniques qui reposent essentiellement sur les phénomènes d'impaction, d'interception et de diffusion, le modèle d'efficacité basé sur une fibre seule permet une estimation correcte de la pénétration de l'aérosol. Pour les filtres électrostatiques, ce modèle est inadapté puisqu'il nécessite une connaissance de la densité de charges et de la distribution de charges de l'aérosol. Les auteurs ont développé un modèle empirique, qui prend en considération la distribution de la taille des particules et des données sur l'efficacité de collecte pour chaque taille. Ce modèle a permis une estimation correcte pour les particules de silice qui sont relativement isométriques. Toutefois, il n'a pas permis de prédire l'efficacité de collecte des fibres d'amiante à partir d'essais avec un aérosol de latex (particules sphériques). Les auteurs avancent comme explications les différences entre les caractéristiques physiques des deux types d'aérosols. Ils soulèvent l'hypothèse que la longueur des fibres serait un meilleur indicateur de l'efficacité de collecte que le diamètre aérodynamique mais soulignent que des investigations plus poussées doivent être menées pour valider cette hypothèse.

12.1.2 Discussion - Conclusion

Il est à noter que les auteurs se sont uniquement intéressés aux performances de filtration, et non aux effets de la granulométrie ou de la forme des particules sur la fuite vers l'intérieur ou sur les performances globales d'appareils de protection respiratoire. Il convient de rappeler que la fuite vers l'intérieur constitue la majeure partie de la pénétration des particules à l'intérieur des APR, comparativement à la pénétration du filtre. Les résultats des études permettent alors de discuter des performances de filtres seulement, mais ne laissent donc pas présager des performances en terme d'efficacité de protection des APR vis-à-vis des fibres.

En conclusion de l'ensemble des études recensées, il semble qu'au regard de la filtration, les aérosols d'amiante soient mieux arrêtés que les aérosols utilisés dans les essais normalisés (NaCl, DEHS). Néanmoins, le peu de données disponibles ne permet pas de conclure sur l'efficacité de filtration au regard des FFA et des FCA (seule une étude a été réalisée en microscopie électronique en transmission à balayage et prenait en compte les FFA et les FCA).

12.2 Comparaison bactéries / aérosols utilisés pour les essais normalisés**12.2.1 Synthèse bibliographique**

Du fait de leur forme rectangulaire et de leur taille, les bactéries peuvent d'un point de vue morphologique être comparées à des fibres. Les études menées pour comparer la pénétration des filtres et l'efficacité des APR vis-à-vis des bactéries et vis-à-vis des aérosols utilisés dans les essais normalisés peuvent fournir également des indications utiles pour évaluer le comportement des fibres d'amiante à la filtration.

Ces dernières années de nombreux auteurs se sont intéressés aux performances des filtres et APR vis-à-vis des bactéries. D'après la revue récente sur la protection respiratoire vis-à-vis des bioaérosols effectuée par Rengasamy *et al.* (2004), l'efficacité de filtration contre les agents biologiques (*mycobacterium chelonae*, *bacillus subtilis* et *bacillus megatherium*, *mycobacterium abscessus*) est cohérente avec l'efficacité attendue pour les agents non biologiques d'après leur performance lors des essais de certification.

Willeke *et al.* (1996) ont étudié la pénétration d'un filtre de masque chirurgical et d'un masque de protection respiratoire et ont montré que la pénétration de différents organismes en forme de tige (*pseudomonas fluorescens*, ATCC 13525, *bacillus alcalophilus*, ATCC 21522, *mycobacterium tuberculosis*), dont les diamètres sont compris entre 0,3 et 0,9 μm , les longueurs sont comprises entre 1 et 4 μm et dont les ratios L/D sont supérieurs à 3, était inférieure à la pénétration de particules sphériques (huile de maïs).

La différence d'efficacité (pénétration) entre les particules sphériques et les bactéries dépend du rapport L/D. Les essais avec les particules sphériques donnent des valeurs de pénétration supérieures aux essais avec les bactéries. L'évaluation de l'efficacité est donc plus conservative avec les particules sphériques qu'avec les bactéries. Pour un même diamètre aérodynamique, la pénétration des bactéries au travers des média filtrant décroît lorsque le rapport L/D augmente.

12.2.2 Discussion - Conclusion

L'efficacité de filtration des organismes biologiques en forme de tige est cohérente avec celle prévue par les essais de certification.

Les résultats en terme d'efficacité de filtration sont cohérents et permettent de renforcer l'hypothèse que les fibres sont mieux arrêtées que les particules sphériques.

12.3 Comparaison Nanoparticules / aérosols utilisés pour les essais normalisés

12.3.1 Synthèse bibliographique

Le diamètre aérodynamique d'une fibre est fortement dépendant du diamètre géométrique (beaucoup plus que de la longueur). De manière générale, le diamètre aérodynamique équivalent d'une fibre d'amiante est d'environ 3 à 5 fois le diamètre géométrique (Timbrell 1965, Counil 2007, Afsset 2009). Une nanoparticule est une particule dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 100 nm.

Une partie des fibres d'amiante peut alors être considérée comme étant des nanoparticules.

Par ailleurs, du fait du manque d'information concernant les fibres fines et courtes d'amiante, l'étude des nanoparticules peut alors apporter quelques explications quant à la filtration des fibres fines d'amiante.

Il ne s'agit pas dans cette partie de passer en revue de manière exhaustive les études relatives aux nanoparticules (dont le domaine est en pleine expansion), mais de s'attacher aux performances de filtration des filtres haute efficacité et APR vis-à-vis des nanoparticules et de comparer ces performances à celles mesurées avec les aérosols de tests normalisés (NaCl et DEHS, DOP, etc....).

Mostofi *et al.* (2010) présentent une revue des travaux de recherche sur les performances de filtration des appareils de protection respiratoire et des filtres mécaniques vis-à-vis des nanoparticules. Les auteurs ont revu les mécanismes de filtration des particules, les MPPS, l'effet de rebond thermique, la vitesse de l'air et le débit d'air, l'influence de l'humidité, l'état de charge des particules, les conditions d'essais normalisées. Compte tenu du manque d'harmonisation de la méthodologie et des protocoles suivis, les résultats sont difficilement comparables d'une étude à l'autre.

Dans le cas des appareils de protection respiratoire, la pénétration des particules est généralement déterminée en fonction du débit d'air plutôt qu'en fonction de la vitesse de filtration

(Mostofi *et al.* 2010). La majorité des études rapportées par Mostofi a montré que les filtres d'APR étaient efficaces pour capter des particules à débit constant compris entre 30 et 85 L.min⁻¹. Les auteurs soulignent que même si le débit de 85 L.min⁻¹ est relativement élevé et destiné à représenter le débit de respiration lors d'un travail actif, il est probable que des débits puissent excéder 350 L.min⁻¹ lors de charges de travail intenses. Des essais plus harmonisés et à des débits plus élevés doivent être entrepris. Mostofi *et al.* (2010) concluent également que des essais doivent être entrepris avec des régimes de débits d'air cycliques qui sont plus réalistes que les débits continus.

Balazy *et al.* (2006) soulignent également que les particules les plus fines étant susceptibles de traverser le filtre lorsque des débits d'air très importants sont atteints en situation de travail, cette pénétration devrait être mesurée en nombre de particules plutôt qu'en masse. La photométrie ne permet en effet pas de prendre en considération la pénétration des fines particules au travers du filtre (Eninger *et al.* 2008b).

Shaffer et Rengasamy (2009) ont également effectué une revue de la littérature relative à la protection respiratoire vis-à-vis des nanoparticules. Les études avec des particules allant jusqu'à 4nm ont montré que la théorie de la filtration conventionnelle est applicable pour décrire les performances de filtration des APR. Les MMPS pour les APR équipés de filtres électrostatiques se situent dans la plage 30-100 nm (Golanski *et al.* 2008, Rengasamy *et al.* 2009, Balazy *et al.* 2006)

Golanski *et al.* (2008) soulignent également que pour les masques, le risque est clairement du à la fuite au visage, et non pas à la pénétration des filtres HEPA.

Rengasamy *et al.* (2009) ont comparé les performances de filtrations des pièces faciales filtrantes certifiées par le NIOSH (N95 et P100) et des pièces faciales filtrantes certifiées au niveau européen (FFP2 et FFP3) vis-à-vis de nanoparticules (4 à 400nm). Les résultats montrent que les APR testés fournissent des niveaux de protection conforme à ceux attendus en matière de pénétration, et que les MPPS se situent dans la plage 30 – 60 nm.

12.3.2 Discussion - Conclusion

Les résultats en terme d'efficacité de filtration sont cohérents. Ils soulignent l'importance de mesurer la pénétration du filtre en nombre de particules plutôt qu'en masse lorsque l'on s'intéresse aux particules les plus fines. Ces études soulignent l'importance de la fuite au visage comme voie d'entrée des particules, comparativement à la pénétration du filtre, mais cette fuite au visage est peu documentée pour les particules les plus fines.

Ces études mettent en évidence que la taille des particules les plus pénétrantes pour les filtres électrostatiques est inférieure à la taille des particules les plus pénétrantes pour les filtres mécaniques. Ce phénomène souligne l'importance de rechercher la taille de particules la plus pénétrante pour chaque filtre, avant d'effectuer des essais.

12.4 Conclusions

Au regard de la filtration, les aérosols d'amiante semblent mieux arrêtés que les aérosols utilisés dans les essais normalisés (NaCl, DEHS). Néanmoins, le peu de données disponibles ne permet pas de conclure sur l'efficacité de filtration au regard des FFA et des FCA (seule une étude a été réalisée en microscopie électronique en transmission à balayage et prenait en compte les FFA et les FCA).

Les études recensées relatives aux performances de filtration vis-à-vis de bactéries en forme de tige sont cohérentes avec les études spécifiquement menées pour comparer la filtration des fibres

d'amiante et la filtration d'aérosols utilisés dans les essais normalisés. Elles permettent de renforcer l'hypothèse que les fibres sont mieux arrêtées que les particules sphériques.

Les études relatives aux nanoparticules permettent de souligner la faiblesse des essais de certification des APR dans la prise en compte de la pénétration des fines particules. Un comptage des particules, plutôt qu'une analyse massique, permettrait de combler ce manque.

L'ensemble des études rapportées s'intéresse aux performances de filtration des APR et non pas à l'efficacité de la protection offerte par l'APR. Compte tenu du fait que la fuite au visage est le paramètre prépondérant dans cette efficacité pour les APR nécessitant un ajustement au visage, il convient de s'interroger sur cette voie d'entrée des fibres d'amiante.

13 Conclusions sur la synthèse bibliographique

A l'issue de ces travaux, il ressort que les études de l'efficacité de protection portent exclusivement sur les appareils de protection respiratoire et non pas sur les vêtements de protection ou sur les dispositifs de protection collective.

Evaluation de l'efficacité de protection des MPC et EPI spécifiquement vis-à-vis de l'amiante

Très peu d'études ont pu être recensées concernant l'évaluation de l'efficacité de protection des équipements de protection collective vis-à-vis de l'amiante.

Quelques études ont été menées afin d'étudier l'efficacité de protection des APR en situation réelle sur des chantiers d'enlèvement d'amiante. Cette efficacité est déterminée à partir du ratio de la mesure de la concentration en fibres d'amiante à l'intérieur de l'APR sur la mesure de la concentration à l'extérieur de l'APR. La mesure des fibres d'amiante ayant été réalisée par MOCP, ces études ne permettent pas de présager de l'efficacité de protection vis-à-vis des fibres fines et des fibres courtes d'amiante.

Par ailleurs, les prélèvements à l'intérieur et à l'extérieur ayant pour des raisons techniques été réalisés dans des conditions différentes (durée de prélèvement, support différent), il convient de s'interroger sur la pertinence de la comparaison de ces mesures. De la même façon, les études recensées utilisent des conditions de prélèvements différentes ce qui les rend difficilement comparables les unes aux autres.

Les études sur les APR dans les chantiers de désamiantage montraient des expositions qui étaient inférieures à la VLEP de l'époque mais qui seraient aujourd'hui supérieures aux VLEP les plus basses, alors même que les fibres fines et les fibres courtes d'amiante n'étaient pas comptabilisées.

La campagne de mesure actuellement menée par la DGT permettra d'apporter des informations utiles quant aux niveaux de concentration en fibres d'amiante (OMS, FFA et FCA) rencontrés en fonction des activités. Le type d'APR à utiliser en fonction des situations et le degré de protection offert pourront alors être discutés.

Représentativité des essais normatifs mettant en œuvre un aérosol de particules caractéristiques des MPPS pour évaluer les performances d'efficacité de protection vis-à-vis des fibres d'amiante (notamment des FCA et FFA)

La synthèse bibliographique réalisée a permis de recenser quelques études visant à évaluer l'efficacité de filtration des filtres utilisés dans des APR ou des extracteurs d'air, spécifiquement vis-à-vis de l'amiante par comparaison aux aérosols utilisés dans les essais normalisés de certification. Au regard du peu de données disponibles, il semble que les aérosols de fibres d'amiante soient mieux retenus par les filtres que les aérosols d'essais normalisés. Cette tendance a été confirmée par les études réalisées avec des bactéries en forme de tiges. Par ailleurs, il semble également que les aérosols de tailles nanométriques sont plus efficacement retenus par le filtre que les aérosols plus grossiers (ce qui est conforme à ce que prévoit la théorie de la filtration). Néanmoins, seule une étude a été réalisée en microscopie électronique en transmission à balayage et a permis de comptabiliser les FFA et FCA. Il n'est donc pas possible de conclure sur l'efficacité de filtration au regard des FFA et des FCA.

Par ailleurs, il convient de rappeler que la fuite vers l'intérieur constitue la majeure partie de la pénétration des particules à l'intérieur des APR comparativement à la pénétration du filtre. Les résultats de ces études ne laissent donc pas présager des performances quant à l'efficacité de protection des APR vis-à-vis des fibres.

Pertinence de déduire l'efficacité de protection dans les conditions réelles d'utilisation à partir de celle établie par des essais normatifs

L'étude des paramètres et des facteurs d'influence sur l'efficacité des APR montre que la plupart de ces paramètres interagissent et que les phénomènes sont complexes. Il apparaît que les essais normatifs prennent en considération les facteurs prépondérants dans l'efficacité de protection des APR et MPC. Cependant, certains auteurs recommandent que les essais soient réalisés à des débits ventilatoires plus importants, permettant de mieux simuler le débit respiratoire lors d'une charge de travail intense.

Dans la mesure où les particules les plus fines pénétrant au travers du filtre contribuent peu à la masse totale des particules ayant traversé le filtre, un comptage du nombre de particules (microniques ou submicroniques) pourrait être plus approprié pour estimer la protection offerte par les APR et les EPI que la détermination actuelle de la masse des particules ayant pénétré. Ce point est d'autant plus important dans le cas d'APR visant à protéger d'une substance pour laquelle la pathogénicité serait liée plutôt au nombre de particules inhalées et non à la masse de particules inhalées, comme c'est le cas pour les fibres d'amiante.

Il pourrait également être plus conservateur pour les APR de procéder comme pour les filtres utilisés pour la filtration de l'air (extracteurs, etc.) ; à savoir rechercher au préalable quelle est la MPPS et de réaliser l'essai avec un aérosol de granulométrie correspondant à cette MPPS, et non plus utiliser un aérosol polydispersé. Ce point est d'autant plus important dans le cas des filtres électret pour lesquels les MPPS sont nettement inférieures aux MPPS des filtres mécaniques et se situent dans le domaine nanométrique.

Il convient, par ailleurs, de rappeler que la pénétration du filtre est une composante parmi les sources possibles de fuite vers l'intérieur des APR et qu'elle ne contribue que très peu à la fuite totale vers l'intérieur (la fuite principale étant la fuite au visage). Ainsi, même si les performances des filtres s'améliorent, il n'en reste pas moins que le problème de l'étanchéité au visage demeure et que ce phénomène est encore actuellement peu étudié en situation réelle (plusieurs auteurs s'attachent à étudier des fuites induites (percement de la pièce faciale, valve défectueuse, etc....) mais ne s'attachent pas à étudier les caractéristiques de la fuite au visage.

Toutes les études visant à déterminer l'efficacité de protection en situation réelle d'utilisation (exposition à l'amiante ou autres particules) mettent en évidence que le niveau de protection offert par l'APR est inférieur au niveau déterminé par les essais normatifs. Les facteurs de protection nominaux, déduits des essais normatifs, ne sont donc pas représentatifs du niveau de protection offert par l'APR en situation réelle. Les facteurs de protection assignés, établis à partir de facteurs de protection déterminés en situation réelle d'exposition, visent à apporter une aide complémentaire pour le choix d'un APR.

Le niveau de protection offert par un APR nécessitant un ajustement au visage (masque, ½ masque, etc..) pourrait être amélioré en vérifiant cet ajustement par la mesure du facteur d'ajustement. De nombreuses études soulignent l'amélioration apportée par cette vérification préalable et par la mise en place d'un programme de protection respiratoire tel que décrit par la norme NF EN 529.

14 Perspectives

A l'issue de ce rapport d'appui scientifique et technique, de nouveaux travaux nécessitent désormais d'être menés dans le cadre d'une expertise collective, pluridisciplinaire et indépendante.

En effet, la saisine initiale (cf annexe 1) demandait également :

- de vérifier l'efficacité des moyens de protection collective et des équipements de protection individuelle vis-à-vis des différentes fibres d'amiante (FFA, FCA) et d'indiquer leurs éventuelles limites ;
- de définir les types d'équipement de protection individuelle adaptés (sur la base d'analyses en META et quelle que soit la nature des fibres (serpentine, amphiboles ou mélange)) en fonction :
 - de la durée des activités et du port de ces équipements
 - des niveaux d'empoussièrement rencontrés
 - des techniques employées
 - de la nature des opérations
 - des nouvelles valeurs limites d'exposition à respecter
 - des facteurs de protection des EPI.

En ce qui concerne ce dernier point, il est à noter que le travail d'expertise collective pouvant être mené sur ce point ne pourra en aucun cas répondre à l'ensemble des questions qui sont ici énumérées. En effet, la réponse à la totalité de ces questions ne peut être effectuée qu'au cas par cas puisqu'elle dépendant des conditions particulières d'exposition à chaque poste de travail et nécessite donc une évaluation des risques professionnels au poste de travail, évaluation qui relève de la responsabilité de chaque employeur.

Cependant le travail d'expertise collective pourra essayer d'évaluer s'il est possible à partir des données qui seront disponibles, par exemple, d'émettre des recommandations particulières en fonction de certaines classes d'empoussièrement à déterminer de manière à guider les choix des employeurs.

La campagne de mesure d'empoussièrement sur les chantiers de désamiantage menée par la DGT actuellement en cours d'exploitation devrait permettre d'apporter les éléments de base indispensables (niveaux d'empoussièrement et d'exposition, techniques de désamiantage utilisées, observations de terrain) à cette réflexion collective.

Toutefois, ce rapport, qui recense les exigences réglementaires relatives à l'amiante en matière de moyens de protection collective et d'équipements de protection individuelle sur les lieux de travail ainsi que les normes d'exigences portant sur l'ensemble de ces dispositifs de protection, permet d'ores et déjà de mettre en évidence les points suivants :

- il existe actuellement une distinction entre la réglementation concernant le retrait de matériaux contenant de l'amiante friable et le retrait de matériaux contenant de l'amiante non friable, notamment en ce qui concerne les mesures à mettre en œuvre (en terme de confinement et de moyens de protection). La question de la pertinence de cette distinction mérite d'être posée à l'issue de ce rapport mais nécessite pour pouvoir y répondre de pouvoir disposer des niveaux d'exposition rencontrés lors de travaux exposant à ces deux types d'amiante ;

- les essais normatifs de certification pour la mise sur le marché des APR mettent en œuvre un aérosol de chlorure de sodium et utilise la photométrie de flamme, comme technique de mesure analytique. Cette technique, qui consiste à mesurer la concentration pondérale des particules, sous-estime par conséquent la contribution des particules les plus fines lors de l'évaluation de la pénétration des filtres utilisés sur les APR. Ainsi, pour les fibres d'amiante dont la pathogénicité est liée au nombre de fibres plutôt qu'à la masse de fibres inhalées, il pourrait se révéler plus judicieux d'adopter une approche de détermination en nombre de particule plutôt qu'en masse ;
- il existe des différences dans les méthodes mises en œuvre dans les essais permettant d'évaluer la pénétration des filtres d'une part pour les filtres à particules à très haute efficacité utilisés dans les systèmes de ventilation et d'autre part pour les filtres des APR. La question de l'application de la démarche qui consiste à rechercher au préalable la taille des particules pour laquelle la pénétration est maximale avant d'effectuer les essais d'évaluation de la pénétration mérite d'être examinée dans le cadre des essais de certification des APR.

En ce qui concerne la vérification de l'efficacité des équipements de protection collective et des équipements de protection individuelle vis-à-vis des FFA et FCA, il semble que l'efficacité de protection des APR dépende de la granulométrie de l'aérosol, plutôt que de la forme fibreuse de l'aérosol. Il s'agit donc d'évaluer la pertinence de réévaluer les facteurs de protection des APR vis-à-vis d'un aérosol de particules de granulométrie similaire à celle des FCA et des FFA.

Dans la mesure où le rapport a permis de mettre en évidence que le niveau de protection offert par l'APR reste inférieur au niveau déterminé par les essais normatifs (notamment au regard de la prépondérance de la fuite induite par la fuite au visage), l'expertise collective aura notamment à se prononcer sur la pertinence de la réévaluation des facteurs de protection assignés et/ou des facteurs de protection en situation réelle de travail ainsi que sur la faisabilité et l'élaboration des protocoles techniques permettant de réévaluer ces facteurs de protection pour les fibres d'amiante (et notamment pour les FFA et FCA).

Par ailleurs, il convient de ne pas oublier que la finalité des facteurs de protection est de servir de guide aux hygiénistes et aux employeurs pour le choix d'un APR. En effet, lorsque le recours à un APR s'avère indispensable, celui-ci doit être choisi en fonction de la concentration maximale ambiante et de son facteur de protection.

15 Bibliographie

15.1 Publications

Afsset. (2009). Les fibres courtes et les fibres fines d'amiante - Prise en compte du critère dimensionnel pour la caractérisation des risques sanitaires liés à l'inhalation d'amiante - Réévaluation des données toxicologiques, métrologiques et épidémiologiques dans l'optique d'une évaluation des risques sanitaires en population générale et professionnelle. Afsset. 379 p.

Afsset. (2010). Valeurs limites d'exposition en milieu professionnel - Évaluation des effets sur la santé et des méthodes de mesure des niveaux d'exposition sur le lieu de travail pour les fibres d'amiante. Afsset. 89 p.

AIHA (2008) : Respirator Performance Terminology. En ligne : <http://www.aiha.org/insideaiha/volunteergroups/Documents/rpc-terms.pdf> (Consulté le 06/12/2010).

Akkersdijk H., Bremmer C.F., Schliszka C. *et al.* (1989). Effect of respiratory protective equipment on exposure to asbestos fibres during removal of asbestos insulation. *Ann. Occup. Hyg.*; 33(1):113-6

Alderman S.L., Parsons M.S., Hogancamp K.U. *et al.* (2008). Evaluation of the effect of media velocity on filter efficiency and most penetrating particle size of nuclear grade high-efficiency particulate air filters. *J. Occup. Environ. Hyg.*; 5(11):713-20

Asgharian B., Cheng Y.S. (2002). The Filtration of Fibrous Aerosols. *Aerosol Science and Technology*; 36(1):10-7

Balazy A., Toivola M., Reponen T. *et al.* (2006). Manikin-based performance evaluation of N95 filtering-facepiece respirators challenged with nanoparticles. *Ann. Occup. Hyg.*; 50(3):259-69

Berndtsson G. (2004). Peak Inhalation Air Flow and Minute Volumes Measured in a Bicycle Ergometer Test. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*; 21(21-30)

Bémer D., Muller J.P. (2010). Comparaison des Efficacités de Captage Mesurées par Traçages Gazeux et Particulaire. *Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail*; 169(4ème trimestre):597-608

Brosseau L.M., Ellenbecker M.J., Evans J.S. (1990). Collection of silica and asbestos aerosols by respirators at steady and cyclic flow. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 51(8):420-6

Brosseau L.M., Evans J.S., Ellenbecker M.J. (1993). An empirical model for estimating the collection efficiency of dust-mist respirators. *Ann. Occup. Hyg.*; 37(2):135-50

Brown R.C. (2001). Filtration in Industrial Hygiene. *AIHAJ.*; 62(5):633-43

Chen C.C., Ruuskanen J., Pilacinski W. *et al.* (1990). Filter and leak penetration characteristics of a dust and mist filtering facepiece. *Am Ind Hyg Assoc J*; 51(12):632-9

Chen C.C., Huang S.H. (1998). The effects of particle charge on the performance of a filtering facepiece. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 59(4):227-33

Cheng Y.S., Yeh H.C. (1983). Theoretical equilibrium bipolar charge distributions of chain aggregates with uniform spheres. *Journal of Aerosol Science*; 14(4):489-94

Cheng Y.S., Yamada Y., Yeh H.C. (1990). Diffusion Deposition on Model Fibrous Filters with Intermediate Porosity. *Aerosol Science and Technology*; 12(2):286-99

Cheng Y.S., Holmes T.D., Fan B. (2006). Evaluation of respirator filters for asbestos fibers. *J. Occup. Environ. Hyg.*; 3(1):26-35

- Cho K.J., Reponen T., McKay R. *et al.* (2009). Large Particle Penetration through N95 Respirator Filters and Facepiece Leaks with Cyclic Flow. *Ann. Occup. Hyg.*;
- Clayton M., Vaughan N. (2005). Fit for purpose? The role of fit testing in respiratory protection. *Ann Occup Hyg*; 49(7):545-8
- Coffey C.C., Lawrence R.B., Zhuang Z. *et al.* (2002). Comparison of five methods for fit-testing N95 filtering-facepiece respirators. *Appl Occup Environ Hyg*; 17(10):723-30
- Cohen H.J., Hecker L.H., Mattheis D.K. *et al.* (2001). Simulated workplace protection factor study of powered air-purifying and supplied air respirators. *AIHAJ.*; 62(5):595-604
- Counil E., Daniau C., Isnard H. (2007). Etude de santé publique autour d'une ancienne usine de broyage d'amiante, le Comptoir des minéraux et matières premières à Aulnay-sous-Bois (Seine-Saint-Denis) - Pollution environnementale de 1938 à 1975 : impact sanitaire et recommandations. Saint Maurice: Institut de Veille Sanitaire. 254 p.
- CRAMIF (2005). Prévention des risques liés à la présence d'amiante lors des travaux de maintenance et d'entretien : le couvreur. *Fiches métiers*. 15p.
- Crump K.S. (2007). Statistical issues with respect to workplace protection factors for respirators. *J Occup. Environ. Hyg.*; 4(3):208-14
- Cuendet P.A., Bilat D. (1984). [Evaluation of the degree of protection provided by a cartridge-mask system during working with asbestos]. *Soz. Praventivmed.*; 29(1):42-3
- Darbord J.C. (2003). Filtration de l'air. In: Masson. Désinfection et stérilisation dans les établissements de soins: guide pratique. 181-3.
- Duling M.G., Lawrence R.B., Slaven J.E. *et al.* (2007). Simulated workplace protection factors for half-facepiece respiratory protective devices. *J. Occup. Environ. Hyg.*; 4(6):420-31
- Eninger R.M., Honda T., Reponen T. *et al.* (2008). What does respirator certification tell us about filtration of ultrafine particles? *J. Occup. Environ. Hyg.*; 5(5):286-95
- Eninger R.M., Honda T., Adhikari A. *et al.* (2008). Filter performance of n99 and n95 facepiece respirators against viruses and ultrafine particles. *Ann. Occup. Hyg.*; 52(5):385-96
- Eshbaugh J.P., Gardner P.D., Richardson A.W. *et al.* (2009). N95 and p100 respirator filter efficiency under high constant and cyclic flow. *J. Occup. Environ. Hyg.*; 6(1):52-61
- Feigley C.E., Chen H.C. (1992). Penetration of several filter materials by asbestos as a function of fiber dimensions. *Am Ind Hyg Assoc J*; 53(12):767-72
- Golanski L., Guillot A., Tardif F. (2008). Are conventional protective devices such as fibrous filter media, respirator cartridges, protective clothing and gloves also efficient for nanoaerosols? (Dissemination Report - DR-325/326-200801-1).
- Grinshpun S.A., Haruta H., Eninger R.M. *et al.* (2009). Performance of an N95 filtering facepiece particulate respirator and a surgical mask during human breathing: two pathways for particle penetration. *J. Occup. Environ. Hyg.*; 6(10):593-603
- Han R.J., Gentry J.W. (1993). Unipolar diffusional charging of fibrous aerosols--Theory and experiment. *Journal of Aerosol Science*; 24(2):211-26
- Hartsky M.A., Reed K.L., Warheit D.B. (2000). Effectiveness of Protective Clothing Fabrics to Aerosols of Chrysotile Asbestos Fibers. In: Cheryl N.Nelson , Norman W.Henry. Performance of Protective Clothing : Issues and Priorities for the 21st Century : seventh Volume, ASTM STP 1386. West Conshohocken PA:American Society for Testing and Materials. pp. 141-54.
- Haruta H., Reponen T., McKay R. *et al.* (2009). AihCe 2009 : Respiratory Protection. Toronto,
- Heim M., Mullins B.J., Wild M. *et al.* (2005). Filtration Efficiency of Aerosol Particles Below 20 Nanometers. *Aerosol Science and Technology*; 39(8):782-9

- Hery M., Villa M., Hubert G. *et al.* (1991). Assessment of the performance of respirators in the workplace. *Ann. Occup. Hyg.*; 35(2):181-7
- Hery M., Meyer J.P., Villa M. *et al.* (1994). Efficacité de demi-masques anti-poussières non ventilés en situation industrielle. *Cahiers de notes documentaires*; 154(1er trimestre):21-33
- Hinds W.C. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particle*.
- Holmer I., Kuklane K., Gao C. (2007). Minute volumes and inspiratory flow rates during exhaustive treadmill walking using respirators. *Ann Occup Hyg*; 51(3):327-35
- Howie R.M., Johnstone J.B.G., Weston P. *et al.* (1996). Workplace Effectiveness of respiratory Protective Equipment For Asbestos Removal Work. (CRR 112/1996).
- Howie R.M. (2001). Effectiveness of Safety Equipment Australia SE400AT Positive-Pressure Demand Filtering Device During Asbestos Removal Operations. 45 p. (RMH/01/196).
- HSE. (1999). HSE Guidance INDG 288: Selection of suitable respiratory protective equipment for work with asbestos. London: HSE Books. 28 p.
- HSE. (2005). HSG53 : Respiratory protective equipment at work - A practical guide. London: HSE Books. 60 p.
- Huang C., Willeke K., Qian Y. *et al.* (1998). Method for measuring the spatial variability of aerosol penetration through respirator filters. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 59(7):461-5
- Huang S.H., Chen C.W., Chang C.P. *et al.* (2007). Penetration of 4.5 nm to 10 µm aerosol particles through fibrous filters. *Journal of Aerosol Science*; 38(7):19-27
- INRS (1998). Exposition Professionnelle des Travailleurs Employés sur les Chantiers d'Enlèvement d'Amiante - Bilan sur 15 chantiers. *Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail*; 173(4ème trimestre):389-94
- INRS. (2007). Travaux de retrait ou de confinement d'amiante ou de matériaux en contenant. Guide de prévention. 103 p. (ED 815).
- INRS. (2010). Exposition à l'amiante dans les travaux d'entretien et de maintenance - Guide de Prévention. INRS. 81 p. (ED 809).
- INRS (2010b). Où trouver les facteurs de protection correspondant à un appareil de protection respiratoire donné ? Documents pour le médecin du travail. 123 (3^{ème} trimestre 2010). 348.
(En ligne : [http://www.dmt-prevention.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/DMT_QR%2045/\\$File/QR45.pdf](http://www.dmt-prevention.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/DMT_QR%2045/$File/QR45.pdf) (consulté le 07/12/2010)).
- Johnston A.M., Miller B.G., George J.P.K. *et al.* (2000). An Investigation of Factors Affecting the Performance of Powered-Assisted Full-Facepiece Respirators in Use. 112 p. (CRR 282/2000).
- Johnston A.R., Myers W.R., Colton C.E. *et al.* (1992). Review of respirator performance testing in the workplace: issues and concerns. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 53(11):705-12
- Johnston W.L., Loflin W.J. (1980). Investigation of the effects of capacity on asbestos vacuum cleaners. *Am Ind Hyg Assoc J*; 41(12):927-31
- Johnston W.L. (1985). Evaluation of Asbestos Fibers in the Exhaust Air of Industrial Vacuum Cleaners. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 46(7):402-6
- Kaufman J., Hastings S. (2005). Respiratory demand during rigorous physical work in a chemical protective ensemble. *J Occup Environ Hyg*; 2(2):98-110
- Kominsky J.R., Freyberg R.W., Chesson J. *et al.* (1990). Evaluation of Two Cleaning Methods for the Removal of Asbestos Fibers from Carpet. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 51(9):500-4
- Lee K.W., Liu B.Y.H. (1981). Experimental Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters. *Aerosol Science and Technology*; 1(1):35-46

- Lee K.W., Liu B.Y.H. (1982). Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters. *Aerosol Science and Technology*; 1(2):147-61
- Lee S.A., Grinshpun S.A., Adhikari A. *et al.* (2005). 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.*; 49(3):245-57
- Martin P., Rousseau R., Brand F. (2004). Détermination des Performances des Masques Anti-poussières à Média Filtrant Classique. *Hygiène et sécurité du travail - Cahiers de notes documentaires*; 197(4ème trimestre):21-9
- Martin S., Moyer E., Jensen P. (2006). Powered, air-purifying particulate respirator filter penetration by a DOP aerosol. *J. Occup. Environ. Hyg.*; 3(11):620-30
- Martin S.B., Jr., Moyer E.S. (2000). Electrostatic respirator filter media: filter efficiency and most penetrating particle size effects. *Appl. Occup. Environ. Hyg.*; 15(8):609-17
- Mostofi R., Wang B., Haghighat F. *et al.* (2010). Performance of mechanical filters and respirators for capturing nanoparticles--limitations and future direction. *Ind Health*; 48(3):296-304
- Myers W.R., Zhuang Z., Nelson T. *et al.* (1995). Field Performance Measurements of Half-Facepiece Respirators--Study Protocol. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 56(8):765-75
- Myers W.R., Zhuang Z. (1998). Field performance measurements of half-facepiece respirators: steel mill operations. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 59(11):789-95
- Myers W.R., Zhuang Z. (1998). Field performance measurements of half-facepiece respirators: developing probability estimates to evaluate the adequacy of an APF of 10. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 59(11):796-801
- Myers W.R., Zhuang Z., Nelson T. *et al.* (1995). Field Performance Measurements of Half-Facepiece Respirators--Study Protocol. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 56(8):765-75
- Nelson T.J. (1996). The assigned protection factor according to ANSI. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 57(8):735-40
- Nelson T.J., Jayjock M.A., Colton C.E. (2000). How protective are respirator assigned protection factors: an uncertainty analysis. *AIHAJ.*; 61(3):388-93
- Nelson T.J., Wheeler T.H., Mustard T.S. (2001). Workplace protection factors--supplied air hood. *AIHAJ.*; 62(1):96-9
- Nicas M., Neuhaus J. (2004). Variability in respiratory protection and the assigned protection factor. *J Occup. Environ. Hyg.*; 1(2):99-109
- NIOSH (1995). Respiratory Protective Devices - Final rule. *Fed. Regist.*; 60(110):30335-404
- NIOSH. (2004). NIOSH Respirator Decision Logic. n°2005-10032 p. En ligne: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-100/pdfs/05-100.pdf>
- NIOSH. (2007a). Determination of Particulate Filter Efficiency Level for N100 Series Filters Against Solid Particulates for Non-Powered, Air-Purifying Respirators. Standard Test Procedure. Procedure No. TEB-APR-TSP-0057, rev2. En ligne : <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/TEB-APR-STP-0057.pdf> (accédé le 14/06/10)
- NIOSH. (2007b). Determination of Particulate Filter Efficiency Level for N99 Series Filters Against Solid Particulates for Non-Powered, Air-Purifying Respirators. Standard Test Procedure. Procedure No. TEB-APR-TSP-0058, rev2. En ligne : <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/TEB-APR-STP-0058.pdf> (accédé le 14/06/10)
- NIOSH. (2007c). Determination of Particulate Filter Efficiency Level for N95 Series Filters Against Solid Particulates for Non-Powered, Air-Purifying Respirators. Standard Test Procedure. Procedure No. TEB-APR-TSP-0059, rev2. En ligne : <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/TEB-APR-STP-0059.pdf> (accédé le 14/06/10)

- NIOSH. (2007d). Determination of Particulate Filter Efficiency Level for R100 Series Filters Against Solid Particulates for Non-Powered, Air-Purifying Respirators. Standard Test Procedure. Procedure No. TEB-APR-TSP-0054, rev2. En ligne : <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/TEB-APR-STP-0054.pdf> (accédé le 14/06/10)
- NIOSH. (2007e). Determination of Particulate Filter Efficiency Level for R99 Series Filters Against Solid Particulates for Non-Powered, Air-Purifying Respirators. Standard Test Procedure. Procedure No. TEB-APR-TSP-0055, rev2. En ligne : <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/TEB-APR-STP-0055.pdf> (accédé le 14/06/10)
- NIOSH. (2007f). Determination of Particulate Filter Efficiency Level for R95 Series Filters Against Solid Particulates for Non-Powered, Air-Purifying Respirators. Standard Test Procedure. Procedure No. TEB-APR-TSP-0056, rev2. En ligne : <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/TEB-APR-STP-0056.pdf> (accédé le 14/06/10)
- NIOSH. (2007g). Determination of Particulate Filter Efficiency Level for P100 Series Filters Against Solid Particulates for Non-Powered, Air-Purifying Respirators. Standard Test Procedure. Procedure No. TEB-APR-TSP-0051, rev2. En ligne : <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/TEB-APR-STP-0051.pdf> (accédé le 14/06/10)
- NIOSH. (2007h). Determination of Particulate Filter Efficiency Level for P99 Series Filters Against Solid Particulates for Non-Powered, Air-Purifying Respirators. Standard Test Procedure. Procedure No. TEB-APR-TSP-0052, rev2. En ligne : <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/TEB-APR-STP-0052.pdf> (accédé le 14/06/10)
- NIOSH. (2007i). Determination of Particulate Filter Efficiency Level for P95 Series Filters Against Solid Particulates for Non-Powered, Air-Purifying Respirators. Standard Test Procedure. Procedure No. TEB-APR-TSP-0053, rev2. En ligne : <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/TEB-APR-STP-0053.pdf> (accédé le 14/06/10)
- Oestenstad R.K., Bartolucci A.A. (2010). Factors affecting the location and shape of face seal leak sites on half-mask respirators. *J Occup Environ Hyg*; 7(6):332-41
- Ohnaka T., Tochiara Y., Muramatsu T. (1993). Physiological strains in hot-humid conditions while wearing disposable protective clothing commonly used by the asbestos removal industry. *Ergonomics*; 36(10):1241-50
- Ortiz L.W., Soderholm S.C., Valdez F.O. (1988). Penetration of respirator filters by an asbestos aerosol. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 49(9):451-60
- OSHA (2006). Assigned Protection Factors; Final Rule. *Fed. Regist.*; 71(164):50122-92
- OSHA (2010). Respiratory Protection. Code of Federal Register; 29 CFR 1910.134(revised 01/07/2010):420-46
- Pui D.Y.H., Kim S.C. (2006). Penetration of Nanoparticles through Respirator Filter Media. 28 p. (254-2005-M-11698).
- Rengasamy A., Zhuang Z., Berryann R. (2004). Respiratory protection against bioaerosols: literature review and research needs. *Am J Infect. Control*; 32(6):345-54
- Rengasamy S., King W.P., Eimer B.C. *et al.* (2008). Filtration performance of NIOSH-approved N95 and P100 filtering facepiece respirators against 4 to 30 nanometer-size nanoparticles. *J Occup Environ Hyg*; 5(9):556-64
- Rengasamy S., Eimer B.C., Shaffer R.E. (2009). Comparison of nanoparticle filtration performance of NIOSH-approved and CE-marked particulate filtering facepiece respirators. *Ann. Occup. Hyg.*; 53(2):117-28
- Rissanen S., Smolander J., Louhevaara V. (1991). Work load and physiological responses during asbestos removal with protective clothing. *Int Arch Occup Environ Health*; 63(4):241-6

- Rousseau R., Iotti J.M., Ouvrai G. *et al.* (2007). Comment bien évaluer les fuites faciales de masques respiratoires - méthodes normatives, artificielles ou méthodes de terrain ? INRS. 23 p. (Note Scientifique et Technique n° 271).
- Shaffer R., Rengasamy S. (2009). Respiratory Protection Against Airborne Nanoparticles : a review. *J Nanopart Res*; 11(1661-72
- Spear T.M., DuMond J., Lloyd C. *et al.* (2000). An effective protection factor study of respirators used by primary lead smelter workers. *Appl. Occup. Environ. Hyg.*; 15(2):235-44
- Spurny K.R., Schoermann J., Opiela H. (1990). Aerosols and protective clothing. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 51(1):36-43
- Stevens G.A., Moyer E.S. (1989). "Worst case" aerosol testing parameters: I. Sodium chloride and dioctyl phthalate aerosol filter efficiency as a function of particle size and flow rate. *Am Ind Hyg Assoc J*; 50(5):257-64
- Tannahill S.N., Willey R.J., Jackson M.H. (1990). Workplace protection factors of HSE approved negative pressure full-facepiece dust respirators during asbestos stripping: preliminary findings. *Ann. Occup. Hyg.*; 34(6):547-52
- Thomas D., Mouret G., Callé-Chazelet S. *et al.* (2008). Filtration des Nanoparticules : un Problème de Taille ? *Hygiène et sécurité du travail - Cahiers de notes documentaires*; 211(2ème trimestre):13-9
- Timbrell V. (1965). The inhalation of fibrous dusts in Section V. Human exposure to Asbestos : Dust Controls and Standards. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*; 132(255-73
- Turpin-Legendre E., Meyer J.P. (2003). Comparison of physiological and subjective strain in workers wearing two different protective coveralls for asbestos abatement tasks. *Appl. Ergon.*; 34(6):551-6
- US EPA (1987). 40 CFR Part 763 "Asbestos". *Fed. Regist.*; 52(210):41826-905
- Vaughan N., Rajan-Sithamparanadarajah B. (2005). Meaningful workplace protection factor measurement: experimental protocols and data treatment. *Ann. Occup. Hyg.*; 49(7):549-61
- Villa M., Hubert G., Lima S. *et al.* (1995). Opérations de désamiantage dans un immeuble de bureaux - Efficacité de la protection individuelle. *Cahiers de notes documentaires*; 161(4ème trimestre):463-7
- Vincent J.H., Johnston W.B., Jones A.D. *et al.* (1981). Static electrification of airborne asbestos: a study of its causes, assessment and effects on deposition in the lungs of rats. *Am Ind Hyg Assoc J*; 42(10):711-21
- Wang H.C., Kasper G. (1991). Filtration efficiency of nanometer-size aerosol particles. *Journal of Aerosol Science*; 22(1):31-41
- Weeks T.J., Burns A.F. (1970). Performance of Dust Respirators Against A Fibrous Dust. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*; 31(3):290-3
- Whyte W. (2010). European Standard EN 1822. In: Wiley Blackwell. *Cleanroom Technology : Fundamentals of Design, Testing and Operation*. 124-5.
- Willeke K., Qian Y., Donnelly J. *et al.* (1996). Penetration of airborne microorganisms through a surgical mask and a dust/mist respirator. *Am Ind Hyg Assoc J*; 57(4):348-55

15.2 Normes

Normes harmonisées au titre de la directive européenne 89/686/CEE

Appareils de protection respiratoire :

NF EN 12941 (Décembre 1998) - Appareils de protection respiratoire - Appareils filtrants à ventilation assistée avec casque ou cagoule - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-034)

NF EN 12941/A1 (Février 2004) - Appareils de protection respiratoire - Appareils filtrants à ventilation assistée avec casque ou cagoule - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-034/A1)

NF EN 12941/A2 (Janvier 2009) - Appareils de protection respiratoire - Appareils filtrants à ventilation assistée avec casque ou cagoule - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-034/A2)

NF EN 12942 (Décembre 1998) - Appareils de protection respiratoire - Appareils filtrants à ventilation assistée avec masques complets, demi-masques ou quarts de masques - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-035)

NF EN 12942/A1 (Février 2003) - Appareils de protection respiratoire - Appareils filtrants à ventilation assistée avec masques complets, demi-masques ou quarts de masques - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-035/A1)

NF EN 12942/A2 (Janvier 2009) - Appareils de protection respiratoire - Appareils filtrants à ventilation assistée avec masques complets, demi-masques ou quarts de masques - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-035/A2)

NF EN 13274-1 (Avril 2001) - Appareils de protection respiratoire - Méthodes d'essai - Partie 1 : détermination de la fuite vers l'intérieur et de la fuite totale vers l'intérieur. AFNOR (Indice de classement : S76-007-1)

NF EN 13274-2 (Avril 2001) - Appareils de protection respiratoire - Méthodes d'essai - Partie 2 : essais pratiques de performance. AFNOR (Indice de classement : S76-007-2)

NF EN 13274-3 (Décembre 2001) - Appareils de protection respiratoire - Méthodes d'essai - Partie 3 : détermination de la résistance respiratoire. AFNOR (Indice de classement : S76-007-3)

NF EN 13274-7 (Mai 2008) - Appareils de protection respiratoire - Méthodes d'essai - Partie 7 : détermination de la pénétration des filtres à particules. AFNOR (Indice de classement : S76-007-7)

NF EN 13274-8 (Mai 2003) - Appareils de protection respiratoire - Méthodes d'essai - Partie 8 : détermination du colmatage par la poussière de dolomie. AFNOR (Indice de classement : S76-007-8)

NF EN 136 (Version corrigée) (Mars 1998) - Appareils de protection respiratoire - Masques complets - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-011)

NF EN 140 (Version corrigée) (Décembre 1998) - Appareils de protection respiratoire - Demi-masques et quarts de masques - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-012)

NF EN 143 (Version corrigée) (Mai 2000) - Appareils de protection respiratoire - Filtres à particules - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-022)

NF EN 143/A1 (Septembre 2006) - Appareils de protection respiratoire - Filtres à particules - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-022/A1)

NF EN 14593-1 (Août 2005) - Appareils de protection respiratoire - Appareils de protection respiratoire isolants à adduction d'air comprimé avec soupape à la demande - Partie 1 : appareil avec masque complet - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-057-1)

NF EN 14594 (Août 2005) Appareils de protection respiratoire - Appareils de protection respiratoire isolants à adduction d'air comprimé à débit continu - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-058)

NF EN 148-1 (Août 1999) - Appareils de protection respiratoire - Filetages pour pièces faciales - Partie 1 : Raccord à filetage standard. AFNOR (Indice de classement : S76-023-1)

NF EN 148-2 (Août 1999) Appareils de protection respiratoire - Filetages pour pièces faciales - Partie 2 : Raccord à filetage central. AFNOR (Indice de classement : S76-023-2)

NF EN 148-3 (Août 1999) - Appareils de protection respiratoire - Filetages pour pièces faciales - Partie 3 : raccord à filetage M 45 X 3. AFNOR (Indice de classement : S76-023-3)

NF EN 149+A1 (Septembre 2009) - Appareils de protection respiratoire - Demi-masques filtrants contre les particules - Exigences, essais, marquage. AFNOR (Indice de classement : S76-014)

Vêtements de protection :

NF EN ISO 13982-1 (Avril 2005) - Vêtements de protection à utiliser contre les particules solides - Partie 1 : exigences de performance des vêtements de protection contre les produits chimiques offrant une protection au corps entier contre les particules solides transportées par l'air (vêtements de type 5) . AFNOR (Indice de classement : S74-551-1)

NF EN ISO 13982-2 (Avril 2005) - Vêtements de protection à utiliser contre les particules solides - Partie 2 : méthode d'essai pour la détermination de la fuite vers l'intérieur d'aérosols de fines particules dans des combinaisons. AFNOR (Indice de classement : S74-551-2)

Normes non harmonisées au titre de la directive européenne 89/686/CEE

Qualité en expertise :

NF X 50-110 (mai 2003) Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise. AFNOR (indice de classement X 50-110).

Appareils de protection respiratoire :

NF EN 529 (Janvier 2006) - Appareils de protection respiratoire - Recommandations pour le choix, l'utilisation, l'entretien et la maintenance - Guide. AFNOR (Indice de classement : S76-005)

Vêtements de protection :

PR NF EN ISO 13982-1/A1 (Avril 2009) - Vêtements de protection à utiliser contre les particules solides - Partie 1 : exigences de performance des vêtements de protection contre les produits chimiques offrant une protection au corps entier contre les particules solides transportées par l'air (vêtements de type 5) . AFNOR (Indice de classement : S74-551-1/A1PR)

Filtres à air à haute efficacité :

NF EN 1822-1 (Janvier 2010) - Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) - Partie 1 : classification, essais de performance et marquage. AFNOR (Indice de classement : X44-014-1)

NF EN 1822-2 (Janvier 2010) - Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) - Partie 2 : production d'aérosol, équipement de mesure et statistiques de comptage de particules. AFNOR (Indice de classement : X44-014-2)

NF EN 1822-3 (Janvier 2010) - Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) - Partie 3 : essais de medias filtrants plans. AFNOR (Indice de classement : X44-014-3)

NF EN 1822-4 (Janvier 2010) - Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) - Partie 4 : essais d'étanchéité de l'élément filtrant (méthode d'exploration) . AFNOR (Indice de classement : X44-014-4)

NF EN 1822-5 (Janvier 2010) Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) - Partie 5 : mesure de l'efficacité de l'élément filtrant. AFNOR (Indice de classement : X44-014-5)

NF X44-013 (Février 1983) - Séparateurs aérauliques - Méthode d'essai des filtres à l'aérosol de chlorure de sodium par photométrie de flamme. AFNOR (Indice de classement : X44-013)

15.3 Législation et réglementation

Réglementation européenne :

Directive 89/686/CEE du Conseil, du 21 décembre 1989, concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux équipements de protection individuelle, Conseil Des Communautés Européennes, (1989) (transposée en droit national dans le Code du Travail, partie IV)

Communication de la Commission dans le cadre de la mise en œuvre de la directive 89/686/CEE du Conseil du 21 décembre 1989 concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux équipements de protection individuelle (Publication des titres et des références des normes harmonisées au titre de la directive) - 2010/C 118/02 – 5 mai 2010

Directive 2009/148/CE du parlement européen et du conseil du 30 novembre 2009 concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à une exposition à l'amiante pendant le travail (transposée en droit national dans le Code du Travail, partie IV).

Directive 89/656/CEE du Conseil du 30 novembre 1989 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé pour l'utilisation par les travailleurs au travail d'équipements de protection individuelle, (1989) (transposée en droit national dans le Code du Travail, partie IV).

Réglementation française :

Articles du Code du travail mentionnés dans le rapport :

- L.4121-2
- L.4321-1 à -5
- R.4121-1 à R.4121-5
- R.4412-94 à R.4412-148
- R.4321-4 à R.4322-3
- R.4323-91 à R.4323-106
- R.4535-10

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine


 Direction
générale du Travail
DGT
 Services régionaux et des
partenaires du Travail
SRET
 Sous-direction des occupations
de travail, de la santé et de la
sécurité au travail
C
 Bureau de la protection de la
santé en milieu de travail
CT 2
 20 43 Quai André-Chevre
75302 Paris Cedex 13
 Téléphone : 01 44 30 75 75
01 44 30 54 08
 Télécopie : 01 44 30 20 49
 Services d'urgence
du public
télémat : 0969 30 1 900



Ministère du Travail, des Relations sociales, de la Famille, de la Solidarité et de la Ville

COURRIER REÇU LE

31 MARS 2009

1252

Monsieur Martin GUESPEREAU,
 Directeur général de l'Agence Française de
 Sécurité Sanitaire, de l'Environnement et du
 Travail (AFSSET)
 253, Avenue du Général LECLERC
 94791 MAISONS-ALFORT

Copie : Didier DOUSSIN, Directeur général
 de la santé
 Laurent MICHIEU, Directeur général de la
 prévention des risques

009/1037

Paris, le 26 MARS 2009

Affaire suivie par : Anita ROMERO-HARLOT

Tél : 01 44 30 26 70

Mail : anita.romero-harlot@dgt.travail.gouv.fr

Objet : évaluation de l'efficacité des moyens de protection collective et des équipements de protection individuelle vis-à-vis de l'exposition des travailleurs aux fibres courtes et fines (FCA) et des fibres fines d'amiante (FFA).

Ref. :

Le 9 février 2009, vous nous avez transmis l'avis de l'AFSSET en réponse aux saisines formulées par la direction générale de la santé, la direction des études économiques et de l'évaluation environnementale et la direction des relations du travail, d'une part, le 7 février 2005, sur l'étude des fibres courtes d'amiante (FCA) et, d'autre part, sur les fibres fines d'amiante (FFA), le 16 mai 2007.

En hygiène industrielle, le contrôle de l'empeusement et le contrôle de la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) sont réalisés suivant la méthode d'analyse en microscopie optique à contraste de phase (MOCP), recommandée par l'OMS, dont les spécifications sont reprises dans la norme française expérimentale XP X 43-269 : 2002.

Il apparaît cependant que cette méthode, pour des raisons de limites analytiques, ne permet pas d'identifier la nature des fibres, ni de comptabiliser celles dont les dimensions sont inférieures à 0,25 µm. Elle ne permet donc pas d'analyser toute la distribution dimensionnelle des fibres d'amiante, notamment les FCA et les FFA.

De plus, l'étude réalisée par votre agence montre que tous les échantillons analysés en milieu professionnel contiennent des FCA et des FFA dont les concentrations moyennes peuvent représenter respectivement jusqu'à 96% et 5,6%, en fonction des activités industrielles concernées.

Concernant l'exposition professionnelle, les recommandations de l'AFSSET portent principalement sur la prise en compte des FFA dont le risque cancérigène a été confirmé dans

G:\SRET\CT2\AMIANTE\B.C\contributions\AFSSET\amisine-Epi\FA\PCA\5.doc

l'étude et sur l'utilisation de la méthode d'analyse en microscopie électronique à transmission analytique (META) qui permet de mesurer les fibres longues incluant les FFA, contrairement à la méthode MOCP, retenue jusqu'ici.

Par ailleurs, l'avis de l'AFSSET préconise de réévaluer les moyens de protection collective et les équipements de protection individuelle (EPI) pour apprécier leur efficacité vis à vis des risques liés aux FFA et aux FCA.

Les EPI sont conçus selon des normes harmonisées au titre de la directive 89/686/CEE.

Ainsi, les caractéristiques des aérosols solides utilisés pour évaluer les EPI sont connues et permettent de connaître le spectre de protection des EPI.

Les appareils de protection respiratoire sont testés avec des aérosols représentatifs des particules les plus difficiles à filtrer, autrement appelées particules les plus pénétrantes « Most Penetrating Particle Size = MPPS » en fonction de leur taille et de leur masse¹.

Les combinaisons de type 5 sont conçues pour protéger des particules solides, selon la norme harmonisée EN ISO 13982-1 et 2; celles conçues pour se protéger des particules radioactives suivent les normes EN 1073-2 (non-ventilée) et EN 1073-1 (ventilée). Les essais visant à vérifier la barrière créée par la combinaison face aux particules solides se font avec des particules dont les caractéristiques sont identiques à celles utilisées pour les appareils de protection respiratoire.

Dans ce contexte, je vous demande de bien vouloir :

- recenser les moyens de protection collective (appareils utilisés pour la mise en dépression des zones, matériaux utilisés pour réaliser le confinement des zones) et équipements de protection individuelle existant actuellement en milieu professionnel, incluant les appareils de production de l'air et les composants permettant le transfert de l'air vers les protections respiratoires, pour la protection des travailleurs vis à vis des risques d'inhalation des fibres d'amiante ;
- vérifier leur efficacité vis à vis des différentes fibres d'amiante (FFA, FCA) et indiquer leurs éventuelles limites ;
- définir les types d'équipements de protection individuelle adaptés en fonction de :
 - ✓ la durée des activités et de port de ces équipements ;
 - ✓ les niveaux d'empoussièrement rencontrés ;
 - ✓ les techniques employées ;
 - ✓ la nature des opérations ;
 - ✓ les nouvelles valeurs limites d'exposition à respecter ;
 - ✓ les facteurs de protection des EPI.

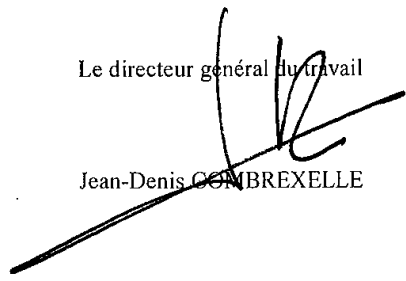
¹ Il s'agit de 0.5 micron en diamètre moyen massique, ce qui correspond à 0.15 microns en diamètre en nombre. Les référentiels techniques utilisés pour évaluer l'efficacité de la filtration des appareils de protection respiratoire utilisent des tailles d'aérosols solides allant de 0.1 à 2.5 microns, suivant une courbe de Gauss, ayant pour taille moyenne 0.5 micron. Ceci correspond aux MPPS évoquées précédemment. Ainsi, les appareils de protection respiratoire doivent pouvoir filtrer ces MPPS pour pouvoir être mis sur le marché. Ceci signifie qu'ils arrêtent a fortiori les particules plus grosses (de taille supérieure à 2.5 microns), ainsi que celles de taille inférieure à 0.1 micron (et jusqu'à 0.02 microns, selon les études réalisées par l'INRS et vraisemblablement jusqu'à 0.005 microns).

Le choix des équipements sera instruit sur la base d'analyses en META et quelle que soit la nature des fibres (serpentine, amphiboles, ou mélange).

L'objectif recherché est d'assurer que les travailleurs ne sont pas exposés, y compris en présence de fortes émissions de fibres sur de courtes durées, à des concentrations supérieures à la VLEP recommandée par le CES qui formulera ses conclusions sur cette question début avril 2009.

Je vous saurais gré de me faire parvenir votre rapport pour le 31 juillet prochain.

Le directeur général du travail


Jean-Denis COMBEXELLE

Annexe 2 : Suivi des mises à jour du rapport

Date	Version	Page	Description de la modification

Annexe 3 : Synthèse des déclarations publiques d'intérêts des experts par rapport au champ de la saisine

RAPPEL DES RUBRIQUES DE LA DECLARATION PUBLIQUE D'INTERETS

IP-A	Interventions ponctuelles : autres
IP-AC	Interventions ponctuelles : activités de conseil
IP-CC	Interventions ponctuelles : conférences, colloques, actions de formation
IP-RE	Interventions ponctuelles : rapports d'expertise
IP-SC	Interventions ponctuelles : travaux scientifiques, essais, etc.
LD	Liens durables ou permanents (Contrat de travail, rémunération régulière ...)
PF	Participation financière dans le capital d'une entreprise
SR	Autres liens sans rémunération ponctuelle (Parents salariés dans des entreprises visées précédemment)
SR-A	Autres liens sans rémunération ponctuelle (Participation à conseils d'administration, scientifiques d'une firme, société ou organisme professionnel)
VB	Activités donnant lieu à un versement au budget d'un organisme

SYNTHESE DES DECLARATIONS PUBLIQUES D'INTERETS DES RAPPORTEURS PAR RAPPORT AU CHAMP DE LA SAISINE

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :		

BROCHARD	Patrick Aucun lien d'intérêt déclaré	25/02/2010
Analyse Anses :	/	
CORBIERE	Jacques IP – SC ; IP - RE Réalisation d'essais pour le compte d'industriels dans le cadre de la radioprotection, en vue de la certification CE, du contrôle de la production ou de la mise au point d'équipements de protection individuelle (organisme notifié). Rédaction de rapports d'expertise relatifs à ces essais. IP - CC Participation aux travaux de normalisation AFNOR, CEN, ISO	29/09/2010

Analyse Anses :	<i>Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la mission de relecture critique effectuée par le rapporteur</i>	
GUIMON	Michèle LD Chef du pôle Risques Chimiques, département Expertise et Conseil Technique de l'INRS IP-AC Participation à des réunions pour définir les mesures de prévention à mettre en œuvre lors de certains types de travaux susceptibles d'exposer à l'amiante auprès de fédérations ou syndicats professionnels du bâtiment IP - CC Participation à des demi-journées de sensibilisation et d'information sur la prévention du risque amiante auprès de fédérations ou syndicats professionnels du bâtiment	27/09/2010
Analyse Anses :	<i>Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la mission de relecture critique effectuée par le rapporteur</i>	
HERERA	Horacio VB Réalisation de prestation d'évaluation de nuisance (métrologie) et conseil donnant lieu à versement à l'organisme d'appartenance (Institut universitaire romand de Santé au Travail)	03/02/2010
Analyse Anses :	<i>Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine</i>	

Annexe 4 : Exigences relatives à la résistance respiratoire

Tableau 14 : exigences de résistance respiratoire pour les filtres à particules (EN 143)

Classe de filtre	Résistance respiratoire maximale (mbar) à	
	30 L.min ⁻¹	95 L.min ⁻¹
P1	0,6	2,1
P2	0,7	2,4
P3	1,2	4,2
Après colmatage		
P1	-	4
P2	-	5
P3	-	7

Tableau 15 : exigences de résistance respiratoire pour les pièces faciales (EN 136, EN 140, EN 149+A1)

Type d'APR ou filtre		Résistance inspiratoire maximale (mbar)				Résistance expiratoire maximale (mbar)			
		Débit continu de 30 L.min ⁻¹	Débit continu de 95 L.min ⁻¹	Débit continu de 160 L.min ⁻¹ ou débit sinusoïdal de 50 L.min ⁻¹ (25 cycles.min ⁻¹ , 2,0 L.coup ⁻¹)	débit sinusoïdal de 100 L.min ⁻¹ (40 cycles.min ⁻¹ , 2,5 L.coup ⁻¹)	Débit continu de 160 L.min ⁻¹ ou débit sinusoïdal de 50 L.min ⁻¹ (25 cycles.min ⁻¹ , 2,0 L.coup ⁻¹)	Débit continu de 10 L.min ⁻¹	Débit sinusoïdal de 50 L.min ⁻¹ (25 cycles.min ⁻¹ , 2,0 L.coup ⁻¹)	débit sinusoïdal de 100 L.min ⁻¹ (40 cycles.min ⁻¹ , 2,5 L.coup ⁻¹)
EN 136	Avec raccords filetés autre que conforme EN 148-2 et 148-3	0,5	1,5	2,5	-	3,0	-	-	-
	Classe 2 et 3 avec raccords fileté conforme EN 148-2	-	-	0,6	-	0,6	-	-	-
	Classe 2 et 3 avec raccords fileté conforme EN 148-3	-	-	-	3,5	-	4,2	7	10
EN 140		0,5	1,5	2	-	3	-	-	-
EN 149+A1	FFP1	0,6	2,1	-	-	3	-	-	-
	FFP2	0,7	2,4	-	-	3	-	-	-
	FFP3	1	3	-	-	3	-	-	-

Tableau 16 : exigences de résistance respiratoire pour les APR à ventilation assistée avec cagoule (NF EN 12941)

Résistance expiratoire (mbar)
25 cycles.min ⁻¹ , 2,0 L.coup ⁻¹ ou bien débit continu de 160 L.min ⁻¹
≤ 5

Tableau 17 : exigences de résistance respiratoire pour les APR à ventilation assistée avec masque complet (EN 12942)

Résistance inspiratoire (avant et après colmatage)		Résistance expiratoire (mbar)
sans ventilation assistée (mbar)	avec ventilation assistée (mbar)	
20 cycles.min ⁻¹ , 1,5 L.coup ⁻¹ ou Débit continu de 95 L.min ⁻¹	25 cycles.min ⁻¹ , 2,0 L.coup ⁻¹	25 cycles.min ⁻¹ , 2,0 L.coup ⁻¹
≤ 11	≤ 3,5	≤ 7

Tableau 18 : exigences de résistance respiratoire pour APR isolant à adduction d'air comprimé à débit continu (EN 14594)

	Résistance inspiratoire maximale (mbar)	Résistance expiratoire (mbar) maximale
Appareil doté d'un masque complet	4,5	10
Appareil comprenant une cagoule, un casque ou une combinaison	La pression dans la cagoule / le casque / la combinaison ne doit jamais être négative	5

Tableau 19 : exigences de résistance respiratoire pour APR isolant à adduction d'air comprimé à débit continu (EN 14594)

		Résistance inspiratoire maximale (mbar)			Résistance expiratoire maximale (mbar)		
		Débit sinusoïdal de 25*2 L.min ⁻¹	Débit sinusoïdal de 40*2,5 L.min ⁻¹	50 L.min ⁻¹ (25 cycles.min ⁻¹ et 2L.coup ⁻¹)	Débit continu 10 L.min ⁻¹	Débit sinusoïdal de 25* 2 L.min ⁻¹	Débit sinusoïdal de 40 * 2,5 L.min ⁻¹
Appareil sans pression positive	sans pièce faciale	4,5	-	3	-	-	-
	Avec pièce faciale	7	-		-	-	-
Appareil avec pression positive		-	5	-	6	7	10

Notes



Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
27-31 avenue du général Leclerc
94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr