

Notes techniques

AMIANTE DANS L'AIR DES LIEUX DE TRAVAIL : PERTINENCE DE L'ANALYSE PAR MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE À TRANSMISSION ANALYTIQUE (META)

Les travaux présentés dans cet article démontrent que la microscopie électronique à transmission analytique (META) permet d'évaluer l'exposition des travailleurs aux fibres d'amiante de manière plus juste, afin d'améliorer la protection des professionnels.

Les 265 résultats de mesurages réalisés sur chantiers révèlent que certains matériaux et techniques génèrent des empoussièrlements très importants. En outre, ils confirment l'absence de corrélation entre les résultats de la méthode de comptage par MOCP (microscopie optique à contraste de phase) et ceux obtenus par META. La France est à ce jour le seul pays au monde à évaluer l'exposition des travailleurs aux fibres d'amiante par META.

Jusqu'en juillet 2012, la réglementation française en matière de prévention des risques liés à l'amiante en milieu professionnel était fondée sur la distinction entre la nature friable et non friable des matériaux amiantés. Le contrôle de la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP), fixée à 0,1 fibre/cm³ sur une heure, était réalisé sur la base d'un comptage effectué par microscopie optique à contraste de phase (MOCP), méthode recommandée par l'OMS [2]. Les fibres prises en compte étaient celles de longueur supérieure à 5 µm, de diamètre inférieur à 3 µm et de rapport longueur sur diamètre supérieur à 3.

Cependant, le pouvoir séparateur lié à cette technique limitait l'observation des fibres à celles de diamètre supérieur à 0,2 µm. En 2009, l'Agence française de sécurité sanitaire, de l'environnement et du travail (AFSSET¹) a publié un avis [3] recommandant d'une part, le mesurage par META des fibres d'amiante permettant le comptage des fibres fines d'amiante (FFA), dont la cancérogénicité est avérée [4] et d'autre part, l'abaissement de la VLEP de l'amiante à 10 fibres par litre (f/L) avec cette méthode d'analyse.

Suite à cette recommandation et afin de vérifier la faisabilité du comptage par META des fibres d'amiante en milieu de travail, la Direction générale du travail (DGT) a organisé une campagne de mesures de novembre 2009 à octobre 2010. L'objectif de cette campagne était d'acquiescer des données sur la répartition granulométrique des

fibres d'amiante émises lors d'interventions sur des matériaux amiantés en milieu professionnel, selon les caractéristiques dimensionnelles des trois classes de fibres : « OMS », fibres courtes (FCA) et fibres fines d'amiante (FFA), telles que définies ci-après :

- fibres « OMS » : longueur (L) > 5 µm ;
0,2 µm < diamètre (D) < 3 µm ; L/D ≥ 3 ;
 - fibres fines d'amiante (FFA) :
L > 5 µm ; 0,01 µm < D < 0,2 µm ; L/D ≥ 3 ;
 - fibres courtes d'amiante (FCA) :
0,5 µm < L < 5 µm ; 0,01 µm < D < 3 µm ; L/D ≥ 3.
- La campagne devait permettre de déterminer par META les concentrations en fibres d'amiante issues de prélèvements individuels en situation professionnelle, relevant de travaux de retrait ou d'encapsulation de matériaux contenant de l'amiante, ou de tout autre type d'intervention sur matériaux amiantés, en milieu intérieur de bâtiment comme en milieu extérieur. Les résultats de cette campagne devaient, sur la base d'éléments concrets scientifiques et techniques, permettre aux pouvoirs publics de faire évoluer la réglementation relative à la prévention des risques liés à l'amiante, notamment sur :
- la méthodologie de prélèvement et de comptage par META des fibres d'amiante en milieu professionnel ;
 - les conditions de contrôle du respect de la VLEP ;
 - l'harmonisation de la prévention du risque amiante, par la suppression des notions d'amiante friable et non friable ;

C. EYPERT-BLAISON,
F. CLERC
INRS,
département
Métrologie
des polluants

A. ROMERO-HARIOT
INRS,
département
Expertise
et conseil
technique

R. VINCENT
INRS,
direction des
Applications

RÉSUMÉ

En 2009, la Direction générale du travail (DGT) a organisé une campagne de mesures visant à vérifier que la microscopie électronique à transmission analytique (META) permettait d'évaluer l'exposition des travailleurs aux fibres d'amiante, définies selon les critères de l'organisation mondiale de la santé (OMS), aux fibres courtes (FCA) et aux fibres fines d'amiante

(FFA). 265 mesures ont été exploitées par l'INRS. Les résultats de comptage confirment l'absence de corrélation entre les méthodes de microscopie optique à contraste de phase (MOCP) et META. Certains matériaux et certaines techniques génèrent des empoussièrtements très importants. Pour certaines typologies de chantier, les appareils de protection

respiratoire (APR) utilisés par les travailleurs assujettis à une VLEP, peuvent ne pas assurer une protection suffisante. Sur la base de ces constats, l'INRS a établi des préconisations [1] sur la métrologie et le contrôle du respect de la VLEP, et sur les facteurs de protection assignés des appareils de protection respiratoire (APR).

Asbestos in the air in workplaces: the relevance of analytical electron microscopy (META) analysis method

In 2009, the French General Directorate of Labor (DGT) organized a campaign of measures to verify that analytical electron microscopy (META) was able to assess the exposure of workers to asbestos fibers, defined according to the World Health Organization (WHO), Short Fibers (FCA) and Fine Asbestos

Fibers (FFA). 265 measurements were exploited by the INRS. The counting results confirm the lack of correlation between Phase Contrast Optical Microscopy and META methods. Some materials and techniques generate very large amounts of dust. For some types of construction site, PPE breathing equipments used by workers

with an OEL (occupational exposure limit value) may not provide adequate protection. On the basis of these findings, the INRS has established recommendations [1] on the metrology and control of OEL, and on the protective factors assigned to PPE respirators.

- les règles de choix des moyens de protection collective et des équipements de protection individuelle selon les niveaux d'empoussièrtement résultant de la mise en œuvre des processus (couple « matériau – technique ») de travail.

Méthodologie de la campagne

→ Protocole d'intervention

Le protocole de la campagne a été élaboré conjointement par la DGT, l'INRS, le laboratoire d'étude des particules inhalées de la Ville de Paris (LEPI) et la Caisse nationale d'assurance maladie des travailleurs salariés (CNAM). Les organisations professionnelles (SYRTA, FFB, FNTP, FNADE, ULSB) y ont été associées². Le SYRTA a coordonné la logistique de la campagne. La participation des entreprises s'est effectuée sur la base du volontariat. Vingt-cinq typologies de chantier « matériau – technique » devaient être évaluées. Chaque typologie retenue était précisément décrite : outils, équipements de protection individuelle et moyens de protection collective utilisés, environnement de chantier, type d'amiante, nature (friable, non friable), etc.

La stratégie de prélèvement consistait à réaliser des prélèvements individuels sur deux opérateurs

simultanément, au cours de deux vacations de deux heures. Un changement de filtre était effectué au bout d'une heure. Cette stratégie devait conduire à quatre mesures au total par chantier. Une mesure correspondait ainsi à deux prélèvements sur filtres, dont les fractions déterminées *a priori* en fonction du niveau d'empoussièrtement estimé, devaient être analysées conjointement. À raison de quatre mesures par chantier, de cinq chantiers par typologie, et de 25 typologies retenues, 500 résultats devaient être collectés, lors des 125 séries de prélèvements correspondantes. Les prélèvements individuels étaient réalisés sur les opérateurs dont l'activité sur le couple « matériau – technique » présentait *a priori* la phase la plus émissive. En plus de ces prélèvements, un prélèvement du matériau à traiter était également réalisé en vue d'une éventuelle analyse ultérieure.

→ Prélèvement et analyse par META

Les prélèvements ont été effectués avec des cassettes de diamètre 37 mm, à un débit de 3 L/min ± 10 %. Les filtres ont été préparés par méthode indirecte, conformément à la norme NF X 43-050 [5]. Un traitement modéré à l'acide chlorhydrique pouvait être appliqué à des filtres chargés en poussières



acido-sensibles (plâtre, par exemple). Les filtres de chaque prélèvement ont été fractionnés et les premières fractions de chacun des deux filtres étaient regroupées pour être traitées et analysées conjointement. Les deux fractions restantes étaient conservées en vue d'une évaluation par MOCP ou d'une éventuelle nouvelle préparation pour analyse par META. Le classement des fibres était effectué sur la base de leurs caractéristiques dimensionnelles et leur nature était spécifiée (serpentine, amphibole).

→ **Analyses par MOCP**

Les fractions de filtres non utilisées pour une analyse par META ont été préparées afin d'être évaluées par MOCP. Le comptage des structures par MOCP a été réalisé conformément à la norme XP X 43-269 (AFNOR, 2002) [6]. Avec cette technique microscopique, seuls les objets correspondant aux critères de taille OMS, tels que définis ci-dessus, sont dénombrés, indépendamment de leur nature chimique. Contrairement aux évaluations par META effectuées par les différents organismes accrédités participant à la campagne de prélèvement et d'analyse, l'ensemble des évaluations MOCP a été réalisé par l'INRS, après que les participants ont renvoyé les fractions de filtres non utilisées pour une analyse par META.

Principaux résultats

71 interventions ont été menées. Entre une et six interventions ont été effectuées pour chaque typologie de chantier. Le nombre de mesures réalisées par chantier a varié de une à quatre. Cette campagne a ainsi permis de collecter 265 mesures de concentration.

Il est globalement observé que les concentrations en FCA sont très supérieures aux concentrations en fibres « OMS » et FFA. Sur l'ensemble des prélèvements réalisés, la proportion en FFA est majoritaire devant celle des fibres « OMS ». Quel que soit le type de fibre (FCA, FFA ou OMS), les concentrations moyennes en amphiboles sont systématiquement inférieures à celles des serpentines. Par ailleurs, les résultats mettent en évidence une forte variabilité des concentrations et des valeurs extrêmes

supérieures à 250 000 fibres par litre (f/L) dans le cas des serpentines FCA (cf. Tableau 1).

Dans le tableau 2, figurent la médiane, la moyenne et le maximum des mesures selon le type de matériau, le type de technique de retrait, le type d'appareil de protection respiratoire (APR) effectivement porté par les travailleurs, ainsi que l'estimation de l'exposition des opérateurs pour chaque type de chantier, en tenant compte des facteurs de protection assignés (FPA) de ces appareils. Pour deux couples « matériau - technique » (découpe de canalisation à la pelle mécanique et découpe de calorifugeage et joints), le nombre total de fibres comptées est très faible. Les concentrations moyennes mettent nettement en évidence des taux élevés lorsque le matériau « plâtre amianté » est traité.

Selon les travaux réalisés, des appareils de protection respiratoire à ventilation assistée de type TM3P présentant un FPA de 60 ou des appareils à adduction d'air ayant un FPA de 250 ont été portés [7]. La pondération des concentrations moyennes et maximales de fibres [OMS+FFA] mesurées sur le chantier par le FPA de l'APR peut conduire à des expositions supérieures à 100 f/L. Cette situation concerne particulièrement les opérations de traitement ou de retrait de plâtres amiantés, quel que soit le procédé mis en œuvre, ainsi que les opérations de retrait de flocage et les interventions dans des bâtiments sinistrés.

Pour plus de la moitié des typologies de chantier, en tenant compte des moyens de protection mis en place et du port des APR, l'exposition maximale [OMS+FFA] estimée est supérieure à 10 f/L.

Influence du matériau et de la technique de retrait

→ **Influence de la technique**

La proportion des différents types de fibres varie en fonction de la technique de retrait. En concentration moyenne, les techniques les plus émissives sont « spatule - raclage » pour les fibres OMS (cf. Tableau 3) ; le retrait à très haute pression et ultra haute pression (THP-UHP) est la technique la plus émissive en FFA et FCA. La technique THP-UHP génère la concentration

		MINIMUM (F/L)	MOYENNE ARITHMÉTIQUE (F/L)	MOYENNE GÉOMÉTRIQUE (F/L)	MÉDIANE (F/L)	MAXIMUM (F/L)
OMS (15%)	Serpentines	1,48	539	34	18	16 300
	Amphiboles	1,47	337	10	5	23 025
	Amiante	1,48	866	50	38	23 025
FFA (17%)	Serpentines	1,48	1 742	48	21	51 450
	Amphiboles	1,47	91	8	5	6 358
	Amiante	1,48	1 822	57	24	51 450
FCA (68%)	Serpentines	1,48	13 602	294	190	256 072
	Amphiboles	1,47	1 220	12	5	89 655
	Amiante	1,48	14 811	430	356	256 072

→ **TABLEAU 1**
Etendues et moyennes des concentrations par type et nature de fibres.

MATÉRIAU	TECHNIQUE	NOMBRE PRÉLÉVTS.	MÉD. OMS+FFA f/L	MOY. OMS+FFA f/L	MAX. OMS+FFA f/L	AVEC APR (f/L)		
						MÉD. OMS+FFA	MOY. OMS+FFA	MAX. OMS+FFA
Terrains amiantifères*	Terrassement - Pelletage	4	8,8	8,8	8,8	0,14	0,14	0,14
Installations de stockage de déchets - Déchargement de big bag et démantèlement avant inertage	Divers - Mécanique ou manuel à préciser	8	6	6	9	4,5	4,5	9,0
Situations accidentelles - au cas par cas	Divers - Mécanique ou manuel à préciser	4	6	6,4	10	0,15	0,16	0,26
Canalisation en amiante ciment - Découpe au godet	Découpage - Sciage - Tronçonnage	6	18	16	21	0,35	0,51	0,9
Canalisation en amiante ciment - Gaine	Déseiboitage - Descellement - Arrachage	16	9	13	29	0,47	0,58	1,3
Calorifugeage / Joints	Découpage - Sciage - Tronçonnage	8	14	19	47	0,07	0,11	0,31
Colles de revêtement de sol (hors mortier colle)	Retrait chimique	4	41	50	89	0,68	0,82	1,5
Enrobés amiantés - Enlèvement par broissage de bitume amianté - Rabotage fraisage d'enrobés amiantés	Divers - Mécanique ou manuel à préciser	4	7,4	33	116	0,12	0,55	1,9
Colles de carrelage murs	Rabotage - Fraisage - Grenailage - Sablage	4	72	72	129	0,28	0,28	0,51
Colles de revêtement de sol (hors mortier colle)	Rectification - Ponçage	20	73	104	421	1,2	1,7	7,0
Colles de revêtement de sol (hors mortier colle)	Burinage - Piquage	8	87	169	449	1,4	2,8	7,5
Toitures et plaques en amiante ciment	Déseiboitage - Descellement - Arrachage	28	36	89	473	0,78	2,5	12
Canalisation en amiante ciment - Gaine -	Découpage - Sciage - Tronçonnage	10	9	57	498	0,29	1,2	8,3
Calorifugeage / Joints	Spatule - Raclage	8	133	327	719	1,1	4,6	12
Calorifugeage / Joints	Déseiboitage - Descellement - Arrachage	8	412	429	795	1,6	1,7	3,2
Faux plafonds - Plaque cartonée	Déseiboitage - Descellement - Arrachage	18	153	355	1593	2,6	5,9	27
Colles de carrelage murs	Burinage - Piquage	12	22	323	1849	0,37	5,4	31
Toitures et plaques en amiante ciment	Découpage - Sciage - Tronçonnage	2	2033	2033	2973	8,1	8,1	12
Canalisation en amiante ciment - Gaine	Burinage - Piquage	3	5150	4135	5369	31	46	86
Toitures et plaques en amiante ciment	Perçage - Vissage - Carottage - Tirage de câbles - Décapage	4	3018	3337	5422	12	13	22
Dalles de sol	Spatule - Raclage	16	109	574	5566	1,8	10	93
Peintures et enduits intérieurs et extérieurs	Burinage - Piquage	4	4060	4073	6356	16	16	25
Peintures et enduits intérieurs et extérieurs	Rectification - Ponçage	16	2320	3055	8580	9,3	12	34
Bâtiment sinistré (incendie, tornade, explosion, ancien site industriel)	Terrassement - Pelletage	12	9	2631	21241	0,15	44	354
Plâtres amiantés	THP - UHP	10	7364	11414	28461	29	46	114
Flocage	Spatule - Raclage	16	2129	6289	29304	8,5	25	117
Plâtres amiantés	Burinage - Piquage	4	17772	22240	49767	71	89	199
Plâtres amiantés	Rectification - Ponçage	8	31909	31115	60443	128	124	242

*Absence d'amiante dans les terres après vérification par META dans le matériau brut

↑TABLEAU 2 Situations triées par concentration moyenne et maximum en somme de fibres d'amiante de classes OMS et FFA. Résultats en fibres par litre (f/L). Le code couleur est : C ≤ 10 f/L vert ; 10 < C ≤ 100 jaune; C > 100 rouge.



moyenne [OMS+FFA] la plus élevée (supérieure à 11 000 f/L) et la technique « rectification - ponçage » génère la concentration maximum [OMS+FFA] la plus élevée (supérieure à 60 000 f/L).

→ Influence du matériau

La proportion de chaque type de fibres varie en fonction du matériau traité. Les matériaux engendrant les plus fortes concentrations moyennes sont le « flocage » pour les fibres d'amiante «OMS» (du fait de la nature amphibole de l'amiante, dont le diamètre des fibres est fréquemment supérieur à celui du chrysotile et correspond aux critères dimensionnels observables par MOCP) et les « plâtres amiantés » pour les FFA et FCA. Les « plâtres amiantés » génèrent les empoussièrlements moyen et maximal [OMS+FFA] les plus élevés (cf. Tableau 4). Pour le couple fibres [OMS+FFA], les valeurs maximales d'exposition estimées en tenant compte du port des APR dépassent très fréquemment la limite de 10 fibres/L, en particulier les retraits de flocage, de plâtres amiantés et de matériaux issus de bâtiments sinistrés. La quantité de FCA moyenne et maximum est systématiquement supérieure à celle des autres fibres.

Comparaison des comptages par META et MOCP

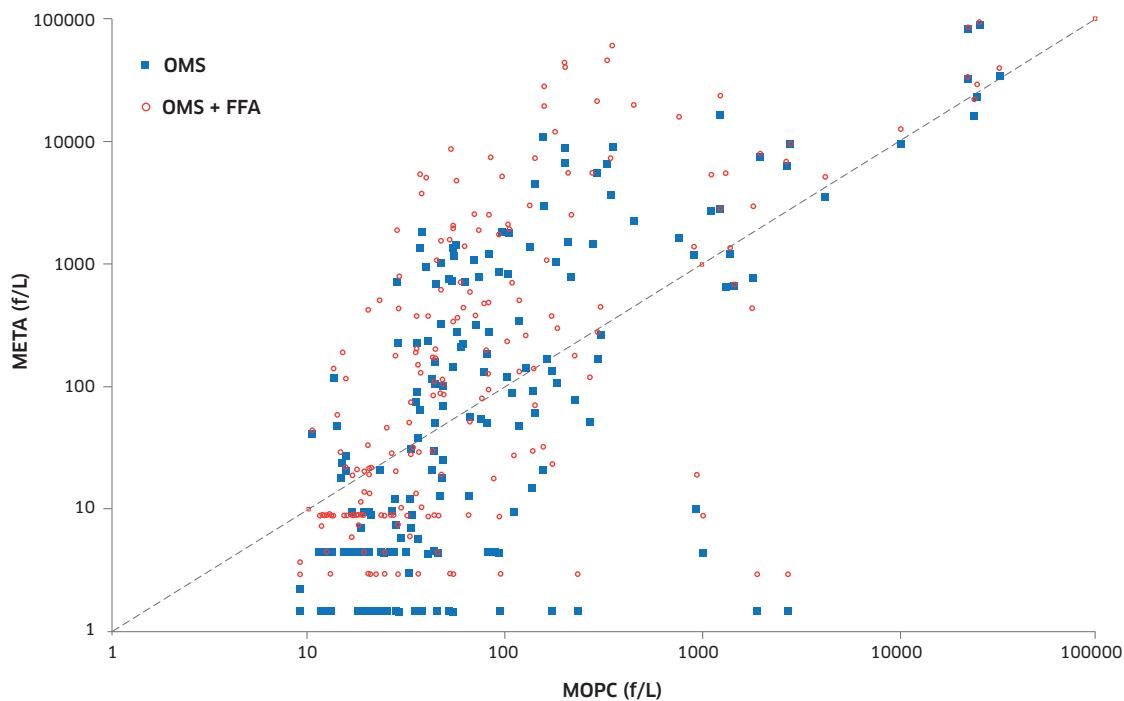
390 fractions de filtres ont pu être évaluées par MOCP. Certains résultats par META n'ont pas pu être comparés à ceux obtenus par MOCP, car des

fractions de filtres étaient manquantes. En effet, des filtres avaient été traités intégralement pour la META ou les fractions destinées à la MOCP n'avaient pas été renvoyées par les laboratoires ou saturées en poussières et, par conséquent, incomptables par une méthode directe imposée par la technique MOCP. 205 résultats par META sont ainsi directement comparables à ceux obtenus par MOCP.

La représentation graphique (cf. Figure 1) des concentrations (en f/L) par MOCP et META, pour l'ensemble des filtres analysés, fait apparaître un nuage de points qui interdit toute relation simple liant les deux techniques. Trois tests statistiques permettant de juger du degré de corrélation entre les deux séries de données confirment qu'il n'est pas pertinent d'envisager un facteur multiplicatif entre les deux techniques de comptage. Tout d'abord, un test de corrélation linéaire a abouti à un coefficient de Pearson R de 0,86. Ensuite, le coefficient de détermination ou R² ajusté prend une valeur de 0,43, ce qui laisse suggérer une faible corrélation et enfin, un test de Fisher-Snedecor des variances a abouti à une valeur p = 0, signifiant qu'il n'y a pas de corrélation au seuil de risque statistique de 0,05. Après avoir été analysés globalement, les résultats ont ensuite été étudiés sous l'angle des ratios META/MOCP et par nature de fibres d'amiante, de matériau et de technique. Le tableau 5 présente les principaux résultats issus de ces analyses.

→ TABLEAU 3
Concentrations exprimées en fibres par litre (f/L), mesurées par type de fibre en fonction de la technique de retrait ou de traitement. Pour [OMS+FFA], le code couleur est : C ≤ 10 f/L vert ; 10 < C ≤ 100 jaune ; C > 100 rouge.

TECHNIQUE	NOMBRE DE PRÉLÈVTS	MOYENNE (F/L)			OMS + FFA (F/L)			OMS (%)	FFA (%)	FCA (%)
		OMS	FFA	FCA	MÉD.	MOY.	MAX.			
Divers - Mécanique ou manuel à préciser	16	3,8	9,1	70	7,4	13	116	6	17	77
Retrait chimique	4	10	40	89	41	50	89	2	17	81
Rabotage - Fraisage - Grenailage - Sablage	4	55	18	1424	72	72	129	14	5	81
Désemboitage - Descellement - Arrachage	76	87	91	1237	37	177	1593	2	9	89
Découpage - Sciage - Tronçonnage	20	72	167	2624	11	239	2973	4	6	91
Terrassement - Pelletage	16	537	1439	6567	8,8	1976	21241	3	6	91
Spatule - Raclage	40	2133	677	12082	187	2810	29304	7	29	64
Perçage - Vissage - Carottage - Tirage de câbles - Décapage	4	1340	1997	31801	3018	3337	5422	4	1	95
Burinage - Piquage	31	754	3210	32675	278	3964	49767	6	6	87
Rectification - Ponçage	44	1936	4879	37485	794	6815	60443	4	11	85
THP - UHP	10	1381	10033	47242	7364	11414	28461	5	11	84



← FIGURE 1
Résultats des concentrations en f/L obtenues par MOPC (en abscisse) et par META (en ordonnée) pour les fibres OMS (carrés bleus) et pour les fibres OMS + FFA (cercles rouges). La droite en pointillés gris matérialise ce que serait l'équivalence entre les résultats obtenus par les deux techniques microscopiques (droite $y = x$).

MATÉRIAUX	NB. DE SITUAT.	MOYENNE (f/L)			OMS + FFA (f/L)			FCA (f/L) MAX.	OMS (%)	FFA (%)	FCA (%)
		OMS	FFA	FCA	MÉD.	MOY.	MAX.				
Installations de stockage de déchets - Déchargement de big bag et démantèlement avant inertage	8	3,0	3,0	7,5	6	6	9	30	22	22	56
Situations accidentelles - au cas par cas	4	1,5	4,9	7,5	6	6,4	10	24	11	35	54
Terrains amiantifères*	4	4,4	4,4	4,3	8,8	8,8	8,8	4,4	33	33	33
Enrobés amiantés - Enlèvement par broissage de bitume amianté-Rabotage fraisage d'enrobés amiantés	4	7,9	26	256	7,4	33	116	851	3	9	88
Colles de revêtement de sol (hors mortier colle)	32	68	46	6972	56	113	449	55671	1	1	98
Calorifugeage / Joints	24	101	157	2108	129	258	795	8897	4	6	90
Colles de carrelage murs	16	66	194	481	22	260	1849	2119	9	26	65
Faux plafonds - Plaque cartonnée	18	188	168	1718	153	355	1593	4195	9	8	83
Canalisation en amiante ciment - Gaine	35	168	211	4896	9,0	379	5369	75017	3	4	93
Dalles de sol	16	215	360	13407	109	574	5566	158737	2	3	96
Toitures et plaques en amiante ciment	34	211	371	5712	63	582	5422	36396	3	6	91
Bâtiment sinistré (incendie, tornade, explosion, ancien site industriel)	12	714	1917	8755	9,0	2631	21241	59575	6	17	77
Peintures et enduits intérieurs et extérieurs	20	959	2300	46978	2545	3259	8580	104642	2	5	94
Flocage	16	5084	1205	16132	2129	6289	29304	89655	23	5	72
Plâtres amiantés	22	4314	16232	75980	14004	20546	60443	256072	4	17	79

← TABLEAU 4
Concentrations de fibres d'amiante exprimées en fibres par litre (f/L) en fonction du matériau traité. Pour [OMS+FFA] et FCA, le code couleur est : C ≤ 10 f/L vert ; 10 < C ≤ 100 jaune ; C > 100 rouge.

* Absence d'amiante dans les terres après vérification par META dans le matériau brut



→ **TABLEAU 5**
Ratios des concentrations mesurées par META sur celles mesurées par MOCP pour un nombre de résultats donné, assortis de leur écart-type arithmétique [α], en fonction de la classe de fibre (OMS ou OMS+FFA) et de la nature des fibres, du matériau amianté et de la technique de retrait.

		NB RÉSULTATS	OMS	OMS + FFA
Nature des fibres	Amiante	196	4,56 [9,41]	15,21 [37,12]
	Serpentines	196	4,31 [9,42]	14,92 [37,14]
	Amphiboles	196	0,39 [0,67]	0,58 [0,78]
Matériau	Colles de revêtement de sol (hors mortier colle)	28	1,98 [4,14]	2,91 [4,55]
	Enrobés amiantés	4	0,52 [0,82]	2,20 [3,54]
	Flocage	12	1,51 [1,15]	1,69 [1,15]
	Terrains amiantifères	4	0,09 [0,08]	0,17 [0,15]
	Plâtres amiantés	16	18,60 [18,26]	94,54 [71,99]
	Peintures et enduits	16	15,07 [9,67]	41,11 [42,26]
	Enrobés amiantés	4	0,52 [0,81]	2,20 [3,54]
Technique	Désemboîtement - descellement - arrachage	52	1,65 [2,96]	4,48 [7,22]
	Rectification-Ponçage	40	13,32 [14,91]	41,77 [60,79]
	THP-UHP	4	11,11 [6,28]	124,34 [55,17]
	Découpage-sciage-tronçonnage	12	0,19 [0,29]	0,85 [1,81]

→ **TABLEAU 6**
Comparaison des résultats obtenus par META et MOCP issus des données de la littérature

1 ^{ER} AUTEUR (ANNÉE)	LIEU DE PRÉLÈVEMENT (NOMBRE)	NATURE DES FIBRES D'AMIANTE	COMPARAISON META/MOCP
Marconi (1984) [9]	Usine freins et embrayages (8) Atelier de maintenance ferroviaire (22)	Chrysotile	Rapport médian META (Fibres totales)/MOCP : de 20 à 60 %
Dement (1990) [10]	Cimenteries, industries textile et produits de friction (179)	Chrysotile	MET/MOCP = 1,07
Verma (1995) [11]	Opérations d'extraction, de broyage et de chargement dans l'industrie extractive. Prélèvements individuels (n = 52) ou d'ambiance (n = 13)	Chrysotile	MET/MOCP : 19 à 76 MET (OMS)/MOCP : 1,4 à 3,2
Crossman (1996) [12]	Retrait de dalles de sol	Chrysotile	META/MOCP = 28,4
Kominski (1998) [13]	Polissage et décapage à l'humide de dalles de sol	Chrysotile	META/MOCP = 97,8
Longo* (2002) [14]	Simulations de manipulations de retrait de joints	Chrysotile	MET/MOCP : 30 à 50
Snyder (1987) [18]	Prélèvements individuels d'origines diverses	Chrysotile Amosite	METBA/MOCP = 53 METBA/MOCP = 10
Cherrie (1989) [20]	Filtres préparés par filtration liquide ou air en laboratoire et filtres prélevés dans l'air des lieux de travail	Chrysotile Amphiboles	MET/MOCP = 4 MET/MOCP = 1,7

* Ces données sont à considérer avec réserve car, à l'inverse des études rapportées ci-dessus, les empoussièrtements élevés ont contraint ces auteurs à utiliser une préparation des filtres par méthode indirecte avant observation en META, conformément à la norme ISO 13794 [15]. Mais contrairement à ce qui est pratiqué en France, ils ont eu recours aux ultrasons, ce qui est de nature à augmenter artificiellement le nombre de fibres fines [16, 17].

- En différenciant par classes de fibres, on dénombre en moyenne plus de 4 fois plus de fibres OMS (ou fibres « optiquement équivalentes ») par META que par MOCP et plus de 15 fois plus lorsque l'on intègre les fibres fines, non observables par MOCP.
- En différenciant ensuite par nature de fibres d'amiante, on constate que les ratios observés dans le cas du chrysotile sont proches de ceux observés pour les fibres OMS. Cette variété d'amiante utilisée dans plus de 95 % des matériaux amiantés du bâtiment a été celle majoritairement identifiée pendant cette campagne. Il importe en outre de rappeler que la MOCP n'est pas discriminante sur la nature des objets dénombrés et que la préparation directe des filtres peut conduire à une sous-estimation

du comptage lorsque des particules masquent les fibres. De plus, le chrysotile a la capacité à générer des fibrilles dont le diamètre peut atteindre 0,02 µm, soit dix fois moins que le pouvoir séparateur d'un microscope optique. Enfin, les fibres de chrysotile sont prélevées sur un support en ester de cellulose, membrane en profondeur, dans laquelle ces fibres tortueuses pénètrent plus ou moins. Par observation en MOCP, une même fibre peut donc se trouver dans plusieurs plans focaux et une mauvaise mise au point peut conduire à scinder artificiellement une fibre longue, qui ne sera alors pas dénombrée en tant que telle. Le cas des amphiboles est différent car ces fibres d'amiante, plus rectilignes, ont une capacité moindre à générer

des fibrilles aussi fines que celles du chrysotile. Les ratios META/MOCP sont donc inférieurs à 1. Ceci tient au fait que la MOCP est non discriminante et dénombre tout objet répondant aux critères morphologiques de fibres. Ainsi, dans le cas des chantiers de retrait de flocage, de l'amosite (amphibole) est présente conjointement à des fibres minérales artificielles qui sont prises en compte par MOCP mais pas par META.

- En différenciant par nature de matériau, on observe des ratios moyens entre les deux techniques d'analyse qui peuvent être proches de 1, comme dans le cas des colles de revêtement de sol, des flocages et des calorifugeages. Dans le cas des terrains amiantifères, dont l'analyse a montré qu'ils ne contenaient pas d'amiante, ou des enrobés amiantés, la MOCP surestime par rapport à la META. À l'inverse, pour les plâtres amiantés, les peintures et enduits, la MOCP sous-estime considérablement le nombre de fibres.
- Enfin, en discriminant par technique de retrait ou de traitement, on observe que le désemboîtement conduit à des ratios moyens (pour les fibres OMS) proches de 1. La technique de découpage-sciage-tronçonnage surestime les concentrations rendues par MOCP, tandis qu'à l'inverse, la rectification-ponçage et la très haute pression (THP) ou ultra haute pression (UHP) (sur un faible nombre de résultats) sont largement sous-estimées.

Discussion

→ Prélèvements

La campagne a permis de recueillir un peu plus de la moitié des résultats sur les 500 attendus. Ceci s'explique principalement par la faible participation de certains secteurs professionnels et par le rejet de données non exploitables suite au non-respect des conditions de mesurage (prélèvement et analyse) par les organismes accrédités. De plus, sur 265 résultats, seuls 205 (soit 77 %) de ceux obtenus par META ont pu faire l'objet d'une comparaison directe avec la MOCP, car les conditions d'identification et de conservation de certains filtres par les laboratoires n'ont pas permis leur prise en compte.

→ Analyse statistique

L'exploitation statistique présentée dans cet article reste limitée à une analyse descriptive des mesures. En effet, une analyse exploratoire plus poussée devrait avoir pour objectif d'identifier les déterminants de l'exposition, c'est-à-dire les conditions de réalisation du chantier, qui contribuent à un niveau d'empoussièrement donné, comme par exemple les méthodes de confinement ou le travail à l'humide. Cette analyse exploratoire doit reposer sur l'explication d'indicateurs de synthèse par chantier. Il pourrait s'agir par exemple de la moyenne ou de la médiane. Or, le faible nombre de chantiers ne permettrait pas d'obtenir

des résultats statistiquement significatifs. Quelques expérimentations ont néanmoins été réalisées [7], permettant uniquement de confirmer des hypothèses déjà connues par expertise, en particulier l'importance du type de matériau amianté retiré : les plâtres et les enduits engendrent des niveaux d'empoussièrement plus élevés.

→ Niveaux d'empoussièrement

Les techniques à fort empoussièrement mettant en jeu la THP-UHP, le raclage, le burinage-piquage, la rectification-ponçage et le terrassement-pelletage sont les plus émissives. Les résultats sont fortement corrélés avec la nature des matériaux traités, notamment les plâtres amiantés et les flocages. Les matériaux à fort empoussièrement sont les plâtres amiantés, les flocages et les résidus issus de bâtiments sinistrés.

Les couples matériau - technique les plus émissifs sont les retraits de flocage par raclage, les retraits de plâtres amiantés par THP-UHP, burinage-piquage et rectification-ponçage, et le terrassement de bâtiments sinistrés. Les couples mettant en jeu des matériaux considérés comme non friables, tels les toitures en amiante-ciment ou les enduits intérieurs-extérieurs, génèrent des empoussètements élevés (supérieurs à 2 000 f/L en moyenne et pouvant atteindre 8 580 f/L pour les valeurs maximales). Ces situations à fort empoussièrement ont justifié la suppression des notions « friable » et « non friable » pour l'amiante, retenues jusqu'en 2012 dans la réglementation française pour définir les niveaux de prévention à mettre en œuvre lors des travaux. Ces résultats confortent l'adoption de la notion d'évaluation des niveaux d'empoussièrement par processus, pour définir les mesures de prévention proportionnellement aux niveaux d'empoussièrement correspondants évalués.

Au regard de ces mesures, les appareils de protection respiratoire utilisés sur les chantiers de désamiantage ne permettent pas toujours d'assurer le respect de la VLEP, compte tenu de leurs trop faibles facteurs de protection assignés (FPA). Les empoussètements les plus élevés conduisent à des dépassement de la valeur limite française (8 heures) de 100 f/L, *a fortiori* en considérant une VLEP-8 h abaissée à 10 f/L, depuis le 2 juillet 2015.

→ Comparaison META-MOCP

La première méthode réglementaire pour l'amiante basée sur la MOCP avait été établie pour évaluer l'empoussièrement en fibres dans les industries utilisatrices de ces fibres [2,8]. En situation d'extraction minière de l'amiante ou en situation industrielle d'utilisation de cette fibre, la MOCP constituait un bon compromis pour le contrôle de l'exposition à l'amiante dans ces environnements de travail « mono-fibre ». De par sa mise en œuvre rapide,



elle fournit un indicateur de l'exposition à des fibres inhalables non différenciées. À la base des études épidémiologiques, elle demeure la technique de référence en France pour l'évaluation des expositions aux Fibres céramiques réfractaires (FCR) et reste très largement utilisée dans le monde. Cette technique est une méthode simple, rapide et peu coûteuse, mais elle n'est plus compatible avec les connaissances désormais disponibles sur la toxicité des FFA.

La présente étude, menée sur un grand nombre de prélèvements obtenus en situations réelles de travail, pouvant inclure des matériaux constitués de particules fines ou autres fibres que l'amiante, a permis de comparer, sur les mêmes filtres, les concentrations par MOCP et par META. Elle confirme ainsi, comme cela a déjà été mentionné dans la littérature (Cf. Tableau 6), qu'il n'existe pas de relation simple liant les résultats de ces deux techniques et que le rapport entre les deux est très variable.

Une autre comparaison a pu être effectuée à l'aide de 5 274 mesurages suffisamment documentés et réalisés par prélèvements individuels avec la méthode par MOCP [7], renseignés dans la base de données Scola qui recueille toutes les valeurs de mesures au poste de travail effectuées par les organismes accrédités réalisant des contrôles de substances chimiques à VLEP contraignante, dont l'amiante. Ces résultats corroborent ceux réalisés par comparaison directe des deux méthodes sur les filtres prélevés dans le cadre de la campagne, notamment la sous-estimation des concentrations mesurées avec la méthode par MOCP.

En dépit de la toxicité des fibres d'amiante et de la forte sinistralité associée, un grand nombre de pays, à l'exception de la France, continue d'utiliser la MOCP pour évaluer l'exposition des travailleurs aux fibres d'amiante, bien que les limites et les écarts avec la META soient désormais largement documentés.

Conclusion

Cette campagne a montré la faisabilité technique du contrôle de l'amiante en milieu de travail par META, quel que soit le niveau d'empoussièrement. En conséquence, les pouvoirs publics ont supprimé les notions d'amiante friable et non friable dans la réglementation sur la protection des travailleurs contre les risques liés à l'amiante. Ils ont adopté le mesurage par META par prélèvement individuel, afin d'évaluer les niveaux d'empoussièrement résultant de la mise en œuvre des processus. Ces évaluations permettent de procéder à la vérification du respect de la VLEP – 8 heures.

La comparaison directe entre les méthodes MOCP et META a confirmé que la MOCP sous-estime, dans la majorité des cas, les niveaux d'empoussièrement par rapport à la META, cette observation se renforçant avec l'élévation des niveaux d'empoussièrement. Cette sous-estimation de l'exposition a pu

entraîner celle des moyens de prévention à mettre en œuvre, notamment les protections collectives, comme la mise en dépression des zones de travail et l'augmentation des renouvellements d'air dans la zone, ainsi que le choix de protections respiratoires insuffisantes.

Les résultats ont en outre montré la limite, dans certaines situations de travail, des appareils de protection respiratoire. L'INRS a ainsi mené une étude de vérification des facteurs de protection assignés en utilisant la META [19].

Lors de cette campagne, peu de situations de type « intervention sporadique », tel que défini dans la directive européenne [21], ont fait l'objet d'une évaluation. Il est nécessaire de poursuivre l'acquisition des données pour ces opérations, afin d'adapter les mesures de prévention et de continuer à sensibiliser les professionnels sur les risques liés à l'amiante. En effet, les chiffres sur la sinistralité des travailleurs du régime général de la Sécurité sociale montrent qu'en France, vis-à-vis des pathologies liées à l'amiante, la sinistralité est la plus élevée pour les travailleurs du second œuvre du bâtiment (plombiers-chauffagistes, électriciens...). Par ailleurs, ces professionnels n'ont pas conscience du risque amiante [22]. Une application, appelée Scol@miante [23] permettant de capitaliser les résultats d'évaluation et destinée à la consultation du public, a été développée. Les entreprises peuvent s'appuyer sur les résultats d'interrogation de cette application pour réaliser leur évaluation *a priori* du risque amiante et adapter leurs moyens de prévention en conséquence.

Les niveaux d'empoussièrement élevés observés lors du traitement de certains matériaux, comme les plâtres et les flocages, rendent indispensable le développement de méthodes de gestion alternatives ou de techniques moins émissives et éloignant les opérateurs de la source d'émission, à l'aide d'outils téléguidés ou commandés à distance. Le procédé d'hydrodécapage à UHP de surface avec aspiration à la source et traitement des effluents contaminés, récemment développé en France pour le traitement de l'amiante, permet d'éloigner l'opérateur de la source d'émission de quelques mètres. Il pourrait apporter une solution pour réduire drastiquement les niveaux d'empoussièrement, lors du retrait des plâtres notamment. En ce qui concerne les flocages, les techniques d'imprégnation préalable à cœur sont souvent négligées par les entreprises, conduisant à des empoussièrement élevés. Il existe pourtant des systèmes d'imprégnation à aiguilles qui, utilisés en phase de préparation, permettent d'abaisser les niveaux d'empoussièrement lors de la phase de retrait. Il est à noter que plusieurs fabricants de grenailleuses – rectifieuses, couramment utilisées pour le retrait des dalles et des colles amiantées, ont doté leurs machines de captage à la source avec contrôle

de la dépression, permettant l'arrêt automatique en cas de défaillance et reliés à des aspirateurs à Très haute efficacité (THE), dotés de cyclones et de système de changement de sacs en sécurité.

Si aucune solution n'est trouvée pour réduire les niveaux d'empoussièrement, selon l'environnement du chantier, le retrait devrait être proscrit et l'accès du public dans les zones présentant ces matériaux à risque, interdit. ●

1. Depuis, l'AFSSET a fusionné avec l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (AFSSA) pour devenir l'Agence

nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses).

2. SYRTA : Syndicat du retrait et du traitement de l'amiante et des autres polluants. FFB : Fédération française du bâtiment. FNTP : Fédération nationale des travaux publics. FNADE : Fédération nationale des activités de dépollution et de l'environnement. ULSB : Union des laboratoires de santé du bâtiment.

Cette étude de l'INRS a été publiée dans le Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2018, 15, 3, pp. 263-274. Sa version française est publiée dans cet article, avec l'autorisation de Taylor & Francis Group. Ses auteurs tiennent à en remercier vivement l'ensemble des contributeurs : fédérations professionnelles, entreprises volontaires, ministère chargé du Travail et agents de l'Inspection du travail, ainsi que tous les contributeurs internes à l'INRS.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] EYPERT-BLAISON C, ROMERO-HARIOT A, VINCENT R. – Amiante : recommandations pour vérifier le respect de la VLEP. *Hygiène et sécurité du travail*, 2013, 231, pp. 40-45.
- [2] OMS. – Détermination de la concentration des fibres en suspension dans l'air – Méthode recommandée : la microscopie optique en contraste de phase (comptage sur membrane filtrante). Genève, OMS, 1998.
- [3] AFSSET. – Les fibres courtes et les fibres fines d'amiante : prise en compte du caractère dimensionnel pour la caractérisation des risques sanitaires liés à l'inhalation d'amiante. Rapport d'expertise collective. Maison-Alfort, Afsset, DECID édition, 2009.
- [4] BOULANGER G., ANDUJAR P., PAIRON J.C. ET AL. – Quantification of short and long asbestos fibers to assess asbestos exposure : a review of fiber size toxicity. *Environmental Health*, 2014, Vol. 13, p. 59.
- [5] NORME NF X 43-050 – QUALITÉ DE L'AIR. Détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission. Méthode indirecte. Saint-Denis – La Plaine, Afnor, 1996.
- [6] NORME EXPÉRIMENTALE XP X 43-269 – QUALITÉ DE L'AIR. Air des lieux de travail. Détermination de la concentration en nombre de fibres par microscopie optique à contraste de phase. Méthode du filtre à membrane. Saint-Denis – La Plaine, Afnor, 2002.
- [7] CLERC F., EYPERT-BLAISON C., GUIMON M., ROMERO-HARIOT A., VINCENT R. – Résultats de la campagne de mesures d'exposition aux fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission analytique (META) – Rapport final. INRS, 2011. Accessible sur : www.inrs.fr/risques/amiante/publications-liens-utiles.html#e9000a97-047c-477a-be13-fe334f076c3b.
- [8] VILLA M., HUBERT G., LIMA S., KAUFFER E., HÉRY M. – Occupational exposure during asbestos removal operations. *Journal of International Society for Respiratory Protection*, 1994, 12, pp. 7-14.
- [9] MARCONI A., MENICHINI E., PAOLETTI L. – A comparison of light microscopy and transmission electron microscopy results in the evaluation of the occupational exposure to airborne chrysotile fibres. *Annals of Occupational Hygiene*, 1984, 28, pp. 321-331.
- [10] DEMENT J.M., WALLINGFORD K.M. – Comparison of phase contrast and electron microscopic methods for evaluation of occupational asbestos exposures. *Appl Occup Environ Hyg*, 1990, 5, pp. 242-247.
- [11] VERMA D.K., CLARK N.E. – Relationships between phase contrast microscopy and transmission electron microscopy results of samples from occupational exposure to airborne chrysotile asbestos. *Am Ind Hyg Assoc J*, 1995, 56, pp. 866-873.
- [12] CROSSMAN R.N., WILLIAMS M.G., LAUDERDALE J. ET AL. – Quantification of fiber releases for various floor tile removal methods. *Appl Occup Environ Hyg*, 1996, 11, pp. 1113-1124.
- [13] KOMINSKI J.R., FREYBERG R.W., CLARK P.J. ET AL. – Asbestos exposures during routine floor tile maintenance. Part 1: Spray-Buffering and Wet-Stripping. *Appl Occup Environ Hyg*, 1998, 13, pp. 101-106.
- [14] LONGO W.E., EGELAND W.B., HATFIELD R.L., NEWTON L.R. – Fiber release during the removal of asbestos-containing gaskets: a work practice simulation. *Appl Occup Environ Hyg*, 2002, 17, pp. 55-62.
- [15] DRAFT INTERNATIONAL ISO/DIS 13794 – AMBIENT AIR. Determination of asbestos fibres. Indirect-transfer transmission electron microscopy procedure. Genève, ISO, 1997.
- [16] KAUFFER E., BILLON-GALLAND M.A., VIGNERON J.C. ET AL. – Effects of preparation methods of airborne concentrations of asbestos fibres by Transmission Electron Microscopy. *Ann Occup Hyg*, 1996, 40, pp. 321-330.
- [17] EYPERT-BLAISON C., VEISSIERE S., RASTOIX O., KAUFFER E. – Comparison of Direct and Indirect Methods of Measuring Airborne Chrysotile Fibre Concentration. *Ann Occup Hyg*, 2010, 54, pp. 55-67.
- [18] SNYDER J.G., VIRTA R.L., SEGRETTO J.M. – Evaluation of the Phase Contrast Microscopy Method for the detection of fibrous and other elongated mineral particulates by comparison with a STEM technique. *Am Ind Hyg Assoc J*, 1987, 48, 5, pp. 471-477.
- [19] CHAZELET S., WILD P., SILVENTE E., EYPERT-BLAISON C. – Workplace respiratory protection factors during asbestos removal operations. *Annals of Work Exposures and Health*, 2018, 62, 5, pp. 613-621.
- [20] CHERRIE J., ADDISON J., DODGSON J. – Comparative studies of airborne asbestos in occupational and non-occupational environments using optical and electron microscope techniques. Lyon, CIRC/IARC, 1989, coll. IARC Sci Publ, 90, pp. 304-309.
- [21] DIRECTIVE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL N° 2009/148/CE DU 30 NOVEMBRE 2009 CONCERNANT LA PROTECTION DES TRAVAILLEURS CONTRE LES RISQUES LIÉS À UNE EXPOSITION À L'AMIANTE PENDANT LE TRAVAIL. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr
- [22] EYPERT-BLAISON C., FREVILLE L., VEISSIERE S., STARCK M.C., CLERC F., ROMERO-HARIOT A., WILD P., LAINE P. – Amiante : un badge pour améliorer la perception du risque. *Hygiène et sécurité du travail*, 2014, 234, pp. 46-50.
- [23] APPLICATION SCOL@MIANTE [EN LIGNE]. INRS, septembre 2015. Accessible sur : www.scolamiante.inrs.fr