

Évaluation de l'exposition aux produits chimiques par les prélèvements surfaciques

AUTEURS :

W. Estève, C. Brochard, V. Matera, S. Melin, H. Poirot, C. Ravera, département Métrologie des polluants, INRS

EN RÉSUMÉ

De nombreuses activités professionnelles génèrent des dépôts sur les surfaces et les objets. Cette pollution surfacique peut alors conduire à une contamination des travailleurs par passage percutané et par ingestion. Une étude a été conduite dans le but de proposer une méthodologie d'évaluation des polluants présents sur les surfaces de travail. Issue de travaux expérimentaux ayant permis d'identifier les paramètres influents, cette méthodologie est actuellement mise en œuvre sur des cas professionnels réels afin de l'affiner et de la valider. Enfin, des outils d'évaluation des contaminations surfaciques automatisés sont actuellement à l'étude afin de s'affranchir d'éventuels biais opératoires, ce qui permettrait d'harmoniser encore davantage les pratiques.

MOTS CLÉS

Prélèvement surfacique / Contamination / Risque chimique / Produit chimique / Méthodologie / Évaluation des risques

L'évaluation de l'exposition aux composés chimiques a longtemps été restreinte à la seule mesure de la fraction volatile et aérosolisée dans l'air de ces composés, et donc à la voie d'exposition par inhalation. Pourtant, l'utilisation de produits semi-volatils et particulaires s'est développée dans de nombreux secteurs d'activité, entraînant une contamination potentielle des surfaces de travail si ces produits ne sont pas intégralement captés à la source.

Les mécanismes de contamination des surfaces sont divers. Ils peuvent être liés à la nature même des composés chimiques, et donc à des mécanismes physiques tels que la diffusion ou la sédimentation [1 à 4], mais également à la nature de l'activité avec des contaminations accidentelles ou grossières par projection par exemple. Cette contamination peut alors induire une exposition directe ou indirecte des travailleurs par contact avec les

surfaces ou les objets contaminés. Les polluants peuvent pénétrer dans l'organisme par passage percutané ou par ingestion en cas de contact main-bouche [5 à 7].

L'établissement de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) ne prend en compte que les effets toxiques induits par l'inhalation des produits. Or, pour une même substance, les mécanismes d'absorption et de métabolisation sont souvent différents par voie cutanée, par ingestion et par inhalation, et impliquent des effets différents sur la santé. De ce fait, suite à des contacts avec des surfaces souillées, l'exposition à certains composés peut avoir des effets sur la santé en dépit du respect des VLEP. Ce mode d'exposition peut ainsi entraîner des effets toxicologiques propres aux polluants concernés, tels que des effets cancérigènes et mutagènes, mais aussi allergiques [8 à 11].

Le prélèvement surfacique représente, dans ce contexte, un outil

Évaluation de l'exposition aux produits chimiques par les prélèvements surfaciques

simple permettant d'évaluer l'exposition des travailleurs à certaines substances chimiques présentes sur les surfaces de leur environnement de travail direct. En complément de la métrologie atmosphérique déjà largement mise en œuvre en hygiène industrielle, cette nouvelle approche permet une évaluation plus globale de l'exposition des travailleurs aux polluants présents dans leur environnement professionnel.

LE PRÉLÈVEMENT SURFACIQUE COMME MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA CONTAMINATION DES SURFACES PROFESSIONNELLES

Deux méthodes de prélèvement surfacique sont principalement employées en hygiène industrielle [12 à 15].

Tout d'abord, le prélèvement par aspiration (ou micro-aspiration) effectué à l'aide de pompes de prélèvement individuel à débit contrôlé et constant sur des filtres ou des membranes adaptés aux polluants ciblés, notamment à leur granulométrie. Ce type de prélèvement est particulièrement adapté aux polluants qui n'adhèrent pas aux surfaces et convient à tout type de surfaces, y compris les plus rugueuses telles que du béton, du bois, des surfaces en relief, mais aussi des surfaces textiles comme des vêtements, des moquettes ou des revêtements de siège.

Le second mode de prélèvement surfacique est le prélèvement par essuyage, également appelé frottis de surface. Celui-ci est effectué avec des lingettes, la plupart du temps imprégnées d'un liquide permettant d'augmenter l'efficacité du prélèvement. Les lingettes peuvent être de nature très variée : des filtres, des

lingettes commerciales pré-humidifiées, des cotons-tiges, des compresseurs en coton tissé, des tampons de coton, des gazes, des éponges... Pour ces deux méthodologies, un consensus se dégage en hygiène industrielle quant à la superficie de prélèvement, à savoir une surface carrée de 10 x 10 cm [12 à 15] généralement délimitée par un gabarit prédécoupé. Cette surface de 100 cm² correspond environ à la superficie d'une paume de main.

L'évaluation de l'exposition aux agents chimiques présents sur les surfaces est cependant confrontée à de nombreux obstacles techniques liés à la très grande diversité des espèces chimiques et à la nature des matériaux rencontrés en milieu professionnel. Ces difficultés entraînent un manque d'harmonisation et de standardisation du matériel et des méthodologies employés, qui rend délicates les comparaisons entre études [16]. L'absence de valeurs limites d'exposition aux pollutions surfaciques ou de valeurs guides témoigne également du manque de maturité de ce domaine. De plus, contrairement aux méthodes de prélèvement atmosphérique qui sont largement employées et maîtrisées, avec des modes opératoires robustes et des paramètres fixés (notamment le débit d'aspiration contrôlé par des systèmes automatisés), le prélèvement surfacique reste une tâche essentiellement manuelle, avec la subjectivité d'interprétation possible des protocoles et la variabilité opératoire intra- et inter-opérateurs. De ce fait, il génère une plus grande variabilité potentielle des résultats. Ainsi, une différence d'angle de la canule de prélèvement par aspiration de quelques degrés peut engendrer une différence importante en termes de rendement de récupération des contaminants, autrement dit d'efficacité du pré-

vement. De la même manière pour le prélèvement par essuyage, des travaux exploratoires [17] ont montré des différences très significatives selon les opérateurs quant à la force appliquée sur les surfaces, avec des superficies couvertes très variables. Ces éléments indiquent clairement la nécessité de proposer davantage de standardisation des pratiques, d'une part à l'aide de méthodologies de prélèvement surfacique, mais également, à terme, à l'aide d'outils automatisés.

En hygiène industrielle, en dépit d'une demande grandissante pour des outils d'évaluation des contaminations surfaciques, le manque d'harmonisation méthodologique représente un frein important au développement et à la mise en œuvre de la caractérisation de cette voie d'exposition des travailleurs.

VERS UNE HARMONISATION DES PRATIQUES DE MISE AU POINT DES MÉTHODES EN LABORATOIRE

Dans le but de combler ces lacunes méthodologiques et de pouvoir répondre à la demande des intervenants en prévention quant à l'évaluation de l'exposition des salariés aux surfaces contaminées, une étude expérimentale a été menée de 2014 à 2017, pour identifier les paramètres influant potentiellement sur l'efficacité des prélèvements surfaciques, et quantifier précisément leur degré d'influence. Des composés modèles organiques et inorganiques ont été choisis pour balayer une large gamme de propriétés physico-chimiques : hydrocarbures aromatiques polycycliques, bisphénols, phtalates, particules métalliques (métaux purs, sels, oxydes)... Ainsi, pour les deux principales techniques de pré-

ment surfacique, par essuyage et aspiration, les paramètres étudiés montrent des influences variables. L'état de surface (rugosité, porosité...) est systématiquement l'un des paramètres les plus influents sur les rendements de récupération obtenus. Concernant le prélèvement par essuyage, la nature des lingettes de prélèvements apparaît comme un paramètre essentiel à l'efficacité du prélèvement, en lien direct avec la nature de la surface, et plus précisément sa rugosité. De la même façon, le solvant d'imprégnation des lingettes se montre significativement influent, avec une forte interdépendance avec la nature chimique et la polarité des polluants. Pour le prélèvement par aspiration, les deux paramètres les plus influents sont la quantité de polluant sur la surface ainsi que le débit de prélèvement. La granulométrie des particules et l'humidité relative de l'atmosphère jouent également un rôle significatif sur les taux de récupération des polluants.

À partir de ces résultats expérimentaux, une réflexion globale, couplée à une analyse de la littérature et des pratiques courantes, a été entreprise pour concevoir un protocole de mise au point de méthodes de prélèvement surfacique. Ce dernier est disponible sur la base de données MétroPol de l'INRS [18]. Il vise à guider l'utilisateur dans sa démarche de mise au point de méthode et à l'orienter dans l'identification des facteurs d'influence en fonction d'une situation professionnelle donnée. En effet, à chaque situation de prélèvement doivent correspondre des conditions opératoires optimales afin d'obtenir la plus grande efficacité possible et ainsi ne pas sous-estimer l'exposition des salariés. Le protocole décrit les principales étapes opératoires, telles que la sélection de la surface modèle utilisée pour la mise au point,

du mode de dopage des surfaces (figure 1), de la méthode et des paramètres de prélèvement (figure 2), de la technique analytique adaptée, conduisant à la validation d'une méthode fiable et robuste de prélèvement et d'analyse des substances chimiques présentes sur les surfaces de travail.

La démarche générale du protocole de mise au point d'une méthode est représentée schématiquement sur la figure 3 page suivante.

Ce protocole introduit notamment la notion de valeur repère métrologique. En effet, devant l'absence de valeurs limites réglementaires ou indicatives d'exposition professionnelle aux pollutions chimiques surfaciques (sauf pour le plomb), il n'est pas possible de valider les méthodes de prélèvement surfacique autour de telles valeurs seuils. Il faut donc se baser sur d'autres bornes de valeurs pour le développement méthodologique, qui peuvent être estimées en se basant sur la littérature en lien avec l'activité considérée, sur des prélèvements semi-quantitatifs effectués lors d'une visite préliminaire, sur l'historique des prélèvements précédemment réalisés ou sur une estimation théorique de la pollution présente.

Si, pour une situation professionnelle donnée, aucun élément objectif ne permet d'estimer une telle valeur repère métrologique, un modèle simplifié d'estimation des quantités potentiellement présentes sur les surfaces professionnelles est proposé dans ce protocole. La notion de quantité théorique sédimentée pendant une durée de huit heures sur une superficie de 100 cm², notée Q^{8h}, est alors définie comme suit :

$$Q_{100\text{ cm}^2}^{8h} (\text{mg}) = \frac{\text{VLEP-8h} (\text{mg/m}^3) \times 28800 (\text{s}) \times \text{vitesse sédimentation} (\text{m/s})}{100}$$

Figure 1 : Exemples de dopage de surfaces modèles de mise au point de méthode par des poudres.

A : manuellement à l'aide d'un tamis. B : à l'aide d'un banc de génération d'aérosols.

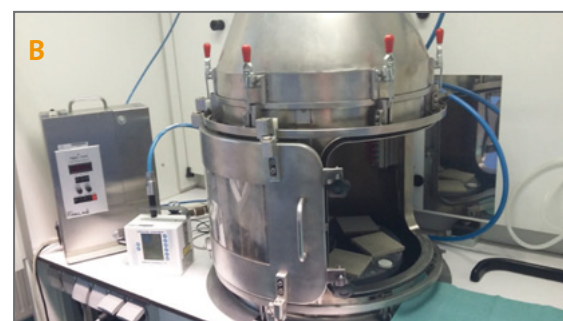
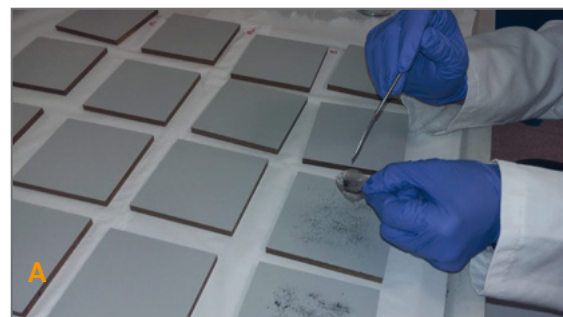
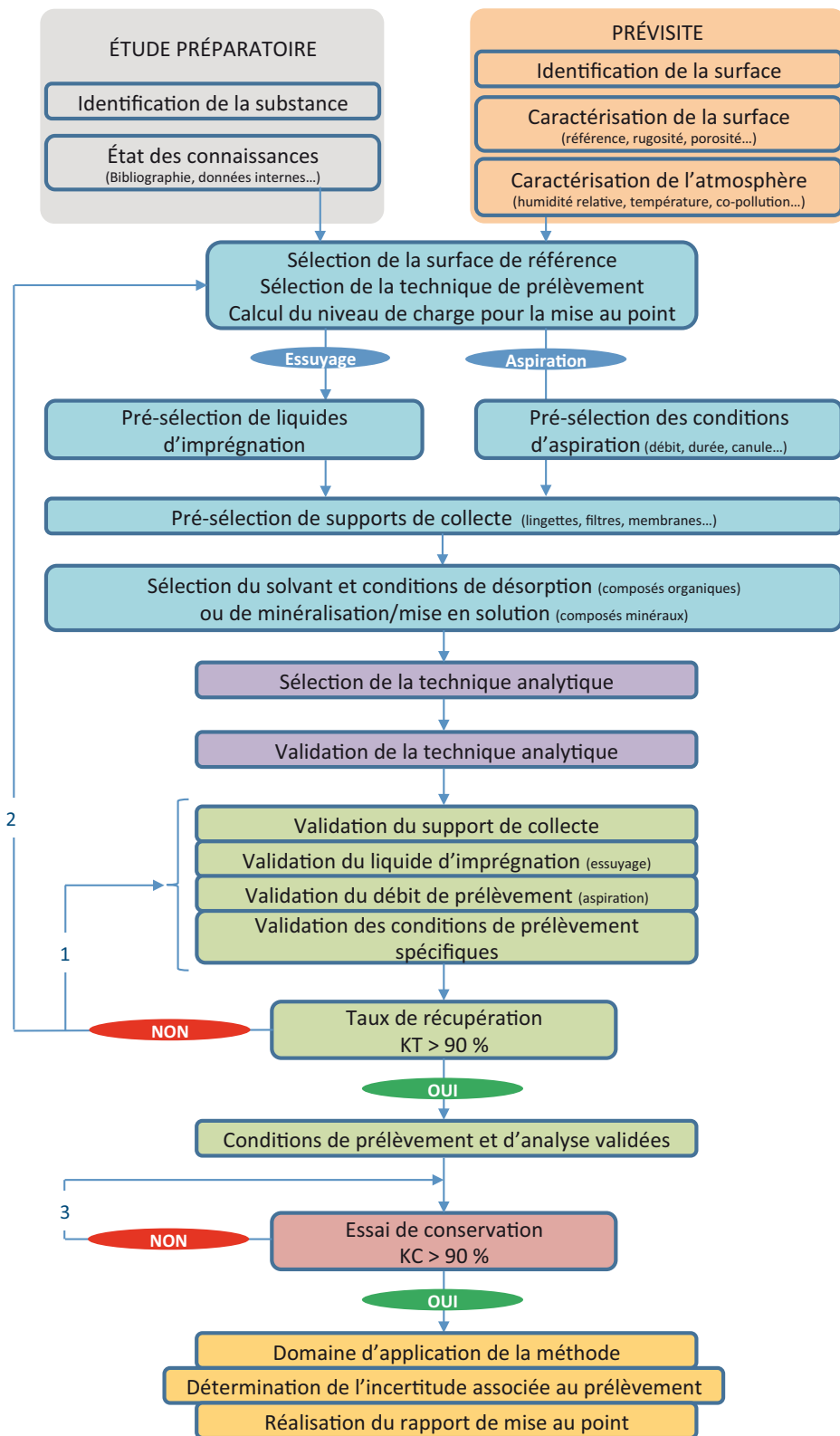


Figure 2 : Exemple de mise au point de méthode de prélèvement par essuyage afin de déterminer le liquide d'imprégnation des lingettes conduisant à un rendement de récupération optimal.



Évaluation de l'exposition aux produits chimiques par les prélèvements surfaciques

Figure 3 : Démarche générale du protocole de mise au point de méthodes de prélèvement surfacique (les étapes 1, 2 et 3 nécessitent des modifications de conditions expérimentales). (KT = rendement de récupération ; KC = rendement de conservation)



Cette quantité correspond au dépôt théorique de la substance présente dans l'atmosphère à une concentration égale à la VLEP-8h, en considérant sa vitesse de sédimentation. Cette valeur purement indicative donne uniquement un ordre de grandeur d'une quantité réaliste potentiellement présente sur une surface de travail. Elle n'a pas de signification toxicologique, il s'agit simplement d'une valeur repère métrologique visant à mettre au point une méthode de prélèvement surfacique précise et adaptée à une situation professionnelle donnée. Le détail du calcul de cette valeur métrologique indicative est donné dans l'encadré 1.

DU LABORATOIRE AU TERRAIN

Afin de vérifier sa bonne applicabilité sur le terrain, ce protocole est actuellement mis en œuvre dans des situations réelles d'évaluation de contamination de surfaces en entreprise. Les entreprises volontaires pour cette étude de terrain ont été recrutées par prospection et également par appel à candidature, notamment dans la rubrique « Participez à la recherche » de la revue *Références en Santé au Travail*. Les situations professionnelles retenues dans le cadre de cette étude sont diverses, tant au niveau de la nature des polluants et des surfaces que de l'environnement professionnel (température, co-pollutions, humidité...) permettant d'éprouver le protocole pour des conditions très variées. Cet appel à candidature est d'ailleurs toujours d'actualité. Les entreprises intéressées par l'évaluation des pollutions surfaciques au sein de leurs locaux peuvent toujours contacter les auteurs de ces travaux pour être inté-

↓ Encadré 1

► NIVEAU DE CHARGE DE RÉFÉRENCE : CALCUL DE LA Q8h

Lors de la mise au point de la méthode de prélèvement surfacique, la quantité de polluant sur la surface, ou niveau de charge, peut avoir une incidence quant à l'efficacité d'une même méthode. Il convient d'optimiser les paramètres opératoires de la méthode de prélèvement autour de la quantité attendue sur le terrain, qui peut être estimée en se basant sur la littérature en lien avec l'activité considérée, sur des prélèvements semi-quantitatifs préalables, sur l'historique des prélèvements précédemment réalisés.

Si, pour une situation professionnelle donnée, le niveau de pollution réel ne peut être préalablement estimé, un modèle simplifié d'estimation des quantités potentiellement présentes sur les surfaces professionnelles est ici proposé. Cette valeur utilisée pour la mise au point de la méthode peut être la quantité théorique de polluant sédimentée pendant une durée de huit heures sur une superficie de 100 cm² notée Q8h, définie comme suit :

$$Q_{8h, 100 \text{ cm}^2} (\text{mg}) = \frac{\text{VLEP-8h} (\text{mg/m}^3) \times 28800 (\text{s}) \times \text{vitesse sédimentation} (\text{m/s})}{100}$$

Cette quantité théorique est calculée sur la base de la valeur limite d'exposition professionnelle dans l'air (VLEP-8h) du polluant prélevé, ainsi que de sa vitesse de sédimentation. Cette grandeur purement indicative donne un ordre de grandeur d'une quantité réaliste potentiellement présente sur une surface de travail. Elle n'a pas de signification toxicologique, c'est simplement un repère métrologique visant à mettre au point une méthode de prélèvement surfacique la plus précise et adaptée à une situation professionnelle donnée. Le préventeur pourra à ce titre adapter cette valeur compte tenu d'une situation particulière, ou élargir la mise au point de la méthode à une gamme plus large de niveaux de charge.

Concernant la vitesse de sédimentation des polluants particuliers, des abaques permettent d'estimer cette grandeur d'après les diamètres des particules [19 à 21]. Elles correspondent à des calculs donnés pour des particules de densité $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$. Pour des particules de densités différentes, une correction pourra être apportée pour estimer au plus près la vitesse de sédimentation, et par conséquent la charge de référence Q8h, selon la formule suivante :

$$V_s = \frac{g \times d^2 \times (\rho_d - \rho_m)}{18 \times \nu} \quad \text{avec :}$$

V_s = vitesse de sédimentation (ou vitesse limite de chute), en m/s ;
 d = diamètre équivalent en volume de la particule, en m ;
 g = accélération de la pesanteur ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) ;
 ν = viscosité de l'air ($\nu = 1,8 \text{ Pa.s}$) ;
 ρ_d = masse volumique (ou densité) des particules ciblées, en kg/m^3 ;
 ρ_m = masse volumique (ou densité) de l'air ($\rho_m = 1,2 \text{ kg/m}^3$).

Pour estimer la vitesse de sédimentation en fonction du diamètre de la particule et de sa densité, des abaques ou des calculateurs sont disponibles en ligne (www.calculatoredge.com/new/stroke.htm).

De manière simplifiée, pour les particules couramment rencontrées en milieu professionnel (i.e. diamètre inférieur à quelques dizaines de μm , soit une vitesse de sédimentation inférieure à quelques dizaines de mm/s), une approximation de la vitesse de sédimentation (V_s réelle approchée) peut être obtenue en corrigeant la vitesse de sédimentation donnée dans les abaques pour des particules de densité 1 kg/m^3 (V_s théorique abaque) par la densité réelle de l'aérosol comme facteur multiplicatif correctif : V_s réelle approchée = V_s théorique abaque $\times \rho_d$.

grées au programme d'étude. Cette phase de l'étude inclut la partie de mise au point en laboratoire de la méthode de prélèvement effectuée en amont, mais aussi plus globalement tout le processus allant de la prise d'information initiale à la planification matérielle et la réalisation de l'intervention (figure 4 page suivante).

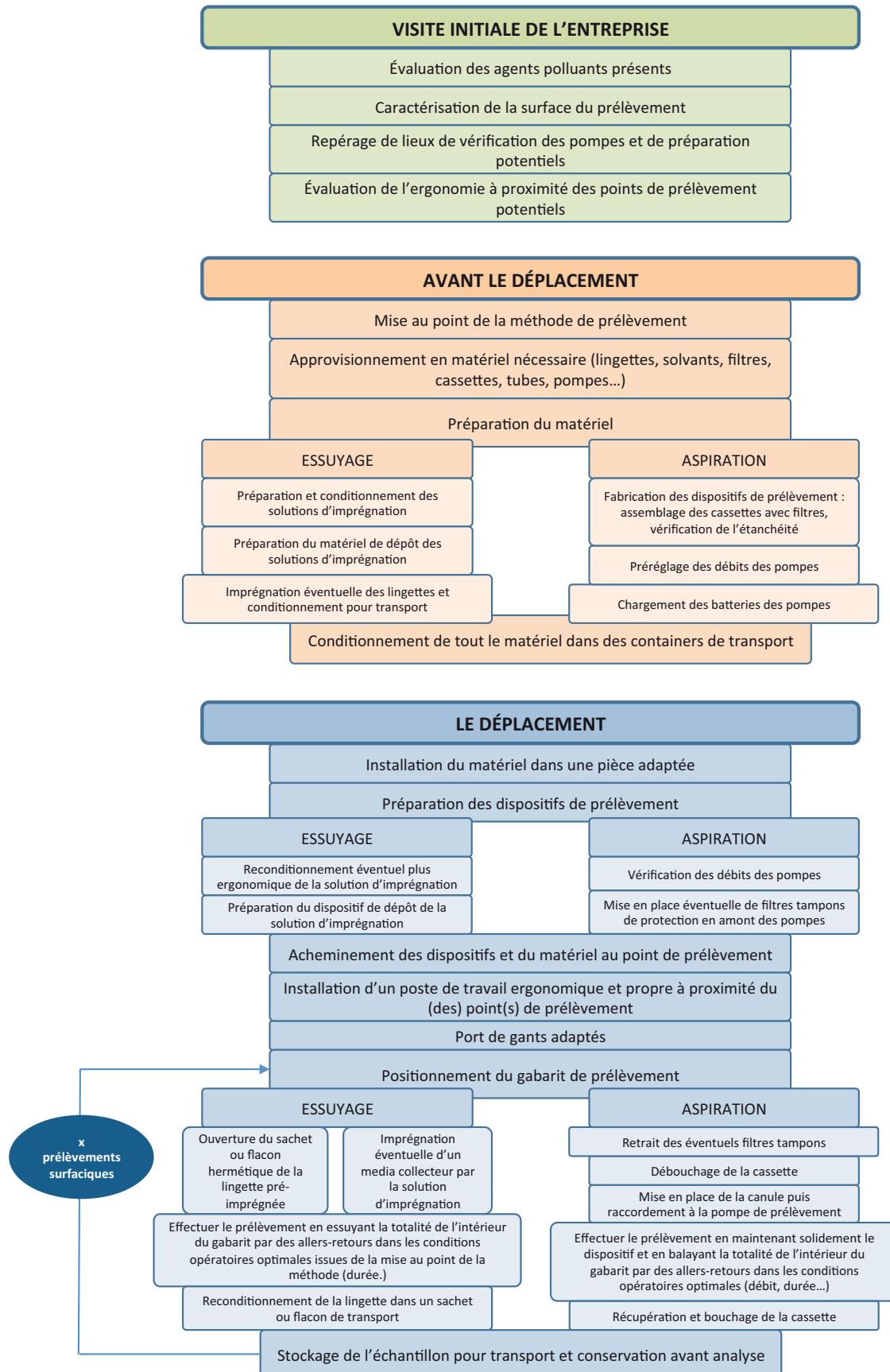
EXEMPLE D'APPLICATION DU PROTOCOLE DE MISE AU POINT SUR UN SITE INDUSTRIEL

L'une des premières mises en œuvre du protocole a été réalisée sur un site industriel utilisant un produit pulvérulent à base de trioxyde de diantimoine (Sb_2O_3) dans le cadre de la fabrication d'un matériau transformé. Les surfaces de prélèvement identifiées lors de la visite préliminaire étaient essentiellement des surfaces métalliques ou plastiques lisses. Compte tenu de la faible rugosité¹ des surfaces, le mode de prélèvement retenu a été le prélèvement par essuyage avec lingette. D'autre part, en raison de l'homogénéité des rugosités des matériaux concernés, un seul type de surface modèle a été utilisé pour la mise au point de la méthode en laboratoire, à savoir une surface lisse de type mélaminé de rugosité $R_a = 1,5 \mu\text{m}$.

1. Le terme rugosité désigne une caractéristique physique de la surface. La rugosité correspond à une modification microgéométrique d'une surface conduisant à des aspérités (appelées pics) et des cavités (appelées creux). Plusieurs grandeurs caractérisent la rugosité d'une surface. L'une des principales, retenue dans ce document, est la rugosité R_a définie comme étant la moyenne des valeurs absolues des écarts entre les pics et les creux par rapport à la ligne moyenne.

Évaluation de l'exposition aux produits chimiques par les prélèvements surfaciques

Figure 4 : Principales étapes indispensables à la réalisation de prélèvements surfaciques en entreprise.



Les dépôts de polluants sur les surfaces modèles de mise au point ont été effectués à l'aide d'une suspension de particules de trioxyde de diantimoine de granulométrie inférieure à 5 µm, similaires à celles rencontrées sur le site industriel. N'ayant pas accès à des données de précédentes campagnes de mesurages ni à des données correspondant à ce secteur d'activité, le niveau de contamination surfacique attendu a été approximé de façon théorique en utilisant le calcul de la valeur repère Q8h.

Des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) indicatives ont été établies pour les composés d'antimoine dans l'air. La France et les États-Unis proposent une valeur commune de 0,5 mg/m³ quel que soit le dérivé d'antimoine. Seule la Suisse établit une valeur propre au trioxyde de diantimoine située à 0,1 mg/m³. Cette dernière valeur, la plus contraignante, a été retenue dans le cadre du calcul de la valeur repère minimale. Compte tenu de la granulométrie et de la densité des particules concernées par cette mise au point, la vitesse de sédimentation maximale a été évaluée à 3,5 mm/s, soit au final une charge basse repère Q8h de 100 µg de trioxyde de diantimoine correspondant à la quantité déposée en 8 heures sur une superficie de 100 cm². Un second niveau de charge équivalent à 10 fois Q8h a également été pris en compte pour la mise au point. Cette valeur haute correspond à une potentielle contamination en condition de travail dégradée ou si le nettoyage du site n'est pas effectué sur une base régulière.

De l'eau ultra-pure a été testée en première intention comme liquide d'imprégnation des lingettes en coton tissé car elle conduit généralement à des rendements de récupération satisfaisants pour le pré-

lèvement de poudres inorganiques. Un taux de récupération proche de 100 % aux incertitudes expérimentales près a été obtenu pour la charge de référence Q8h (charge basse), confirmant ce choix pour l'imprégnation des lingettes (figure 5). En revanche, pour le niveau de charge plus élevé, le taux de récupération était de l'ordre de 70 %. Ce résultat, conforme aux observations expérimentales préalables, indique une possible influence du niveau de charge sur l'efficacité du prélèvement. Un mélange eau-isopropanol a ensuite été testé mais n'a pas eu d'effet significatif sur les taux de récupération.

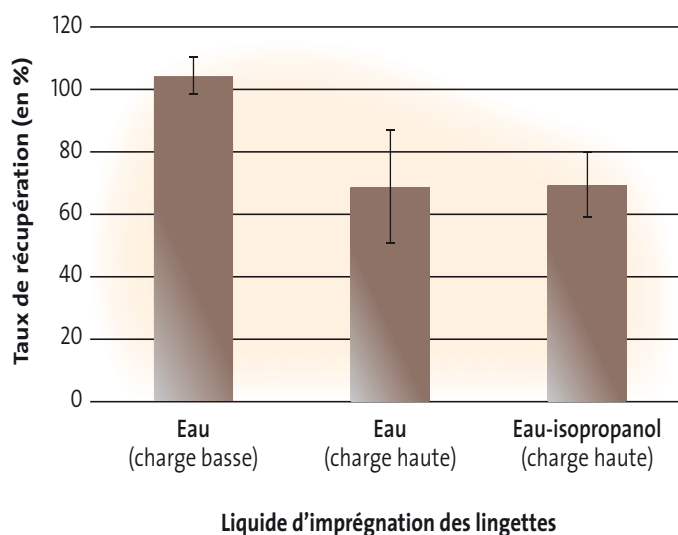
Compte tenu de son efficacité pour le niveau de charge de référence Q8h, l'eau ultra-pure seule a tout de même été retenue pour l'imprégnation des lingettes. Ainsi, pour les prélèvements surfaciques donnant des résultats proches de Q8h (de quelques dizaines à quelques centaines de µg pour 100 cm²), la valeur obtenue peut être considérée comme la masse réellement présente sur la surface considérée.

En revanche, pour des prélèvements conduisant à des masses de trioxyde de diantimoine plus importantes (supérieures au mg pour 100 cm²), il pourrait être appliqué un facteur correctif sur les masses obtenues pour tenir compte du rendement de 70 % observé.

La chaîne de fabrication du matériau final fonctionnait selon un processus vertical utilisant la circulation par gravité naturelle et des tapis roulants pour véhiculer les produits primaires et intermédiaires. Trois zones de la chaîne de fabrication ont été ciblées pour ces mesures : la zone d'introduction du produit pulvérulent pur contenant le trioxyde de diantimoine (zone 1) située au second étage du bâtiment, l'alimentation en granulés thermoformés à partir notamment de la poudre précédente (zone 2) au premier étage et enfin, une extrudeuse située à un étage inférieur mettant en forme le produit final sous forme de plaques (zone 3).

Globalement, une décroissance des quantités d'antimoine présent sur les surfaces de travail a pu être

Figure 5 : Taux de récupération de l'antimoine déposé sur la surface modèle de mise au point.



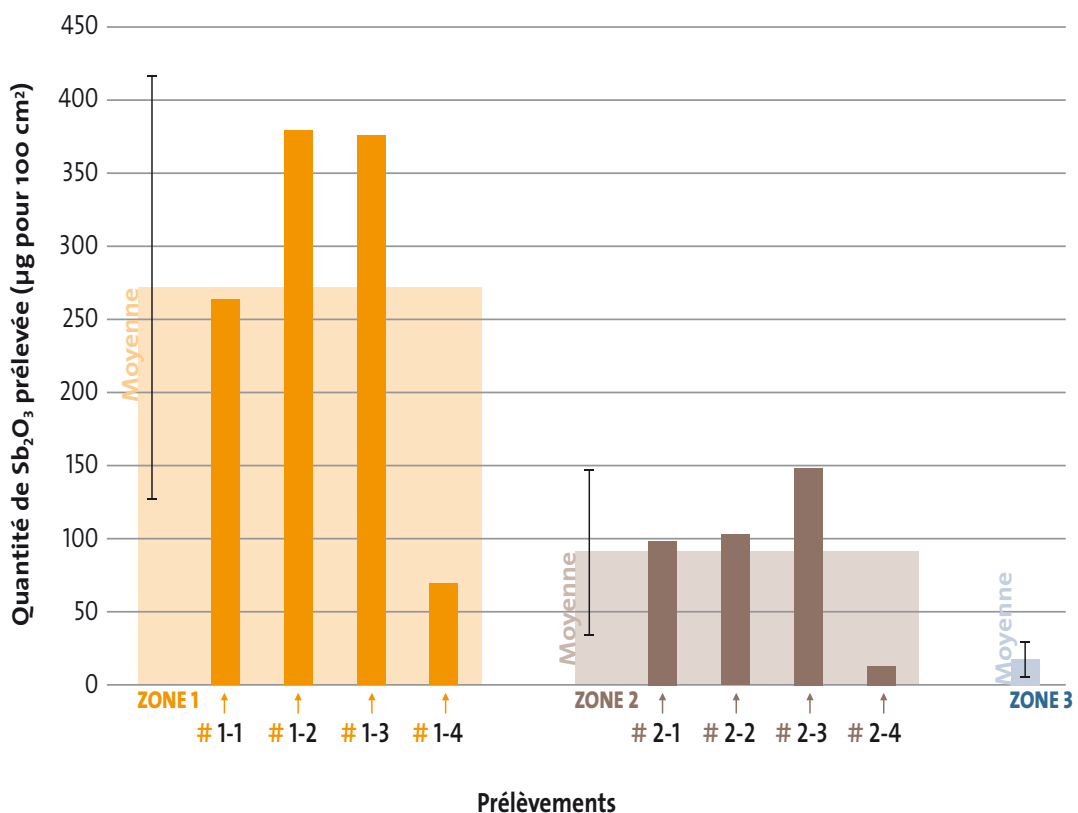
Évaluation de l'exposition aux produits chimiques par les prélèvements surfaciques

observée à mesure de la progression dans la chaîne de fabrication, autrement dit de la transformation de l'antimoine de l'état de poudre, puis à celui de granulés jusqu'à l'état de solide formé. Ainsi, les quantités de dérivé d'antimoine retrouvées sur les surface de travail passent d'environ 300 à 5 µg/100 cm² en fin de ligne de fabrication (figure 6). Il est à noter que tous les résultats étant du même ordre de grandeur que la valeur de référence basse de la mise au point de la méthode (de quelques dizaines à quelques centaines de µg de trioxyde de diantimoine pour 100 cm²), aucun facteur correctif n'a été appliqué aux masses déterminées après analyse. Les incertitudes élevées associées aux résultats reflètent une importante variabilité spatiale dans chacune des zones. En effet, certains

prélèvements ont été effectués à distance des zones de manipulation des composés afin d'évaluer le caractère dispersif des pollutions. Ainsi, dans la zone 1, les trois prélèvements effectués au niveau des trappes d'introduction du produit pulvérulent pur donnent des résultats comparables avec une masse moyenne prélevée de 340 ± 65 µg. Un quatrième prélèvement effectué à une distance de quelques mètres de ces trois points révèle une masse de 59 µg, ce qui fait mécaniquement augmenter l'écart type. En termes d'interprétation, cette mesure objective une décroissance des dépôts en fonction de la distance à la source. Les résultats des prélèvements effectués dans la zone 2 montrent également une tendance à la variabilité spatiale. Trois prélèvements

ont été effectués dans un même périmètre, à savoir la zone de déversement de matériau secondaire sous forme de copeaux fins. Les résultats de ces trois prélèvements sont apparus très homogènes entre eux avec une concentration surfacique autour de 120 µg/100 cm². Un quatrième prélèvement effectué sur un plan de travail situé à une dizaine de mètres de la zone précédente s'est avéré nettement moins concentré en trioxyde de diantimoine (12 µg/100 cm²). Outre des différences de niveaux de contamination, une différence d'aspect de la contamination des surfaces liée à la morphologie des particules présentes a pu être observée entre ces deux zones. En effet, les particules rencontrées sur les surfaces de la zone 1 sous forme d'une couche homogène sont

Figure 6 : Quantité d'antimoine (équivalent trioxyde de diantimoine) présente sur les surfaces le long de la chaîne de fabrication, zones 1, 2 et 3, avec les moyennes des résultats par zone.



directement issues de la poudre initiale et présentent un diamètre faible, de l'ordre du micron. Cette morphologie favorise le transport dans le compartiment atmosphérique et donc leur dispersion potentielle à distance du point d'utilisation. En revanche, les particules rencontrées dans la zone 2 sont des fragments plus épars et plus grossiers de granulés de matériau de diamètres apparents de quelques centaines de microns. Ces particules sédimentent potentiellement plus rapidement par gravité, et sont moins sujettes à un déplacement dans l'atmosphère. Compte tenu de la morphologie de celles-ci, l'éventuel transfert de polluants à distance du point d'utilisation s'effectue *a priori* plutôt au niveau du sol par transport sur les semelles des chaussures.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le protocole proposé vise à évaluer l'exposition des salariés aux contaminations présentes sur les surfaces de travail. Les premières applications à des cas réels d'exposition montrent sa robustesse et son efficacité. La valeur repère métrologique utilisée pour la mise au point méthodologique est un élément central de ce protocole dont la pertinence et l'adéquation devront être évaluées sur un plus grand nombre de scénarii pour l'ajuster ou la valider définitivement. Ces évaluations ont pour objectif de réaliser des cartographies précises des contaminations surfaciques, le long d'une chaîne complète de fabrication par exemple, mais également à l'intérieur même de chaque zone intermédiaire de travail.

Avec ces cartographies, idéalement en complément de données atmosphériques, biométaboliques et aérodynamiques, les entreprises disposent d'un outil supplémentaire pour réduire l'exposition des salariés ; elles peuvent ainsi s'appuyer sur des mesures concrètes pour déployer, ou adapter, des dispositifs de protection collective optimisés : systèmes d'aspiration, systèmes automatisés de manipulation, modes opératoires...

Le travail va désormais consister à poursuivre la phase de validation terrain du protocole pour le faire évoluer de sorte à le rendre encore plus accessible et simple à mettre en œuvre, tant au niveau de la mise au point en laboratoire que de la mise en œuvre sur le terrain. Une fois stabilisé, ce protocole représentera une base de pratiques communes en hygiène du travail qui permettra une comparaison plus rigoureuse entre les mesures et études réalisées par différentes équipes sur différents sites. À terme, cette harmonisation métrologique couplée à des données biologiques, physico-chimiques, épidémiologiques et ergonomiques, représente un pré-requis indispensable pour accélérer la réflexion sur la mise en place de valeurs guides ou de valeurs limites d'exposition aux pollutions surfaciques.

Enfin, contrairement au prélèvement atmosphérique qui est une technique bien maîtrisée avec des modes opératoires robustes et des paramètres fixés, tels que le débit d'aspiration géré par une pompe autonome, le prélèvement surfacique génère une plus grande variabilité opératoire de par sa dimension manuelle. Le prélèvement surfacique reste une tâche effectuée par un opérateur, avec la subjectivité d'interprétation pos-

sible des protocoles et la variabilité intra- et inter-opérateurs. Il semble nécessaire de pouvoir utiliser des outils mécaniques automatisés de prélèvement des polluants sur les surfaces de travail, permettant ainsi de s'affranchir de certains biais opératoires. Dans ce contexte, un des axes de recherche en cours vise à concevoir de tels outils standardisés. La démarche consiste à identifier les principaux facteurs de biais opératoires afin de proposer des solutions techniques qui seront intégrées à des outils simples et facilement utilisables sur le terrain.

POINTS À RETENIR

- L'exposition des travailleurs aux substances chimiques peut se faire par inhalation, par ingestion ou par contact cutané avec des surfaces contaminées dans l'environnement de travail.
- Il n'existe pas de valeurs limites d'exposition professionnelle ni de valeurs guides pour les pollutions surfaciques.
- Deux méthodes de prélèvement surfacique sont employées pour évaluer cette exposition (par aspiration et par essuyage), qui nécessitent une tâche manuelle avec une variabilité opératoire potentiellement significative.
- Un protocole de mise au point de méthodes de prélèvement surfacique a été élaboré et diffusé *via* la base de données MetroPol de l'INRS afin d'harmoniser les pratiques des intervenants en prévention.
- Les premières applications en entreprise de ce protocole montrent sa robustesse et son efficacité.
- La phase de validation de ce protocole sur le terrain se poursuit pour l'optimiser et en faire une base de pratiques communes en hygiène du travail.

BIBLIOGRAPHIE
EN PAGE SUIVANTE



Évaluation de l'exposition aux produits chimiques par les prélèvements surfaciques

BIBLIOGRAPHIE

- 1 | LIU BY, AGARWAL JK - Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow. *J Aerosol Sci.* 1974 ; 5 (2) : 145-48.
- 2 | PUI DY, ROMAY-NOVAS F, LIU BY - Experimental Study of Particle Deposition in Bends of Circular Cross Section. *Aerosol Sci Technol.* 1987 ; 7 (3) : 301-15.
- 3 | CHEN F, YU SCM, LAI ACK - Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model. *Atmos Environ.* 2006 ; 40 (2) : 357-67.
- 4 | YU CP, LIU CS, TAULBEE DB - Simultaneous diffusion and sedimentation of aerosols in a horizontal cylinder. *J Aerosol Sci.* 1977 ; 8 (5) : 309-16.
- 5 | DENNERLEIN K, SCHNEIDER D, GÖEN T, SCHALLER KH ET AL. - Studies on percutaneous penetration of chemicals. Impact of storage conditions for excised human skin. *Toxicol In Vitro.* 2013 ; 27 (2) : 708-13.
- 6 | LLEWELYN VK, BERGER L, GLASS BD - Percutaneous absorption of chemicals: developing an understanding for the treatment of disease in frogs. *J Vet Pharmacol Ther.* 2016 ; 39 (2) : 109-21.
- 7 | GORMAN NG M, SEMPLE S, CHERRIE JW, CHRISTOPHER Y ET AL. - The relationship between inadvertent ingestion and dermal exposure pathways: a new integrated conceptual model and a database of dermal and oral transfer efficiencies. *Ann Occup Hyg.* 2012 ; 56 (9) : 1 000-12.
- 8 | ERIKSSON K, WIKLUND L - Dermal exposure to styrene in the fibreglass reinforced plastics industry. *Ann Occ Hyg.* 2004 ; 48 (3) : 203-08.
- 9 | GIJSBERS JH, TIELEMANS E, BROUWER DH, VAN HEMMEN JJ - Dermal exposure during filling, loading and brushing with products containing 2-(2-butoxyethoxy)ethanol. *Ann Occ Hyg.* 2004 ; 48 (3) : 219-27.
- 10 | CREPY MN - Dermatoses professionnelles aux fluides de coupe. *Allergologie-dermatologie professionnelle TA 61. Doc Méd Trav.* 2000 ; 83 : 295-304.
- 11 | CREPY MN - Dermatoses professionnelles allergiques aux métaux. Quatrième partie : allergie de contact aux autres métaux. Fiche d'allergologie-dermatologie professionnelle TA 90. Documents pour le médecin du travail. Paris : INRS ; 2011 : 21 p.
- 12 | MC ARTHUR B - Dermal Measurement and Wipe Sampling Methods: A Review. *Appl Occup Environ Hyg.* 1992 ; 7 (9) : 599-606.
- 13 | CLINGENPEEL S, HANDY R, PAHLER L, SLEETH D ET AL. - A comparative evaluation of the effectiveness of wipe sampling materials to remove beryllium from differently textured surfaces using zinc oxide as a surrogate. *J Chem Health Saf.* 2019 ; 26 (1) : 15-22.
- 14 | CREEK KL, WHITNEY G, ASHLEY K - Vacuum sampling techniques for industrial hygienists, with emphasis on beryllium dust sampling. *J Environ Monit.* 2006 ; 8 (6) : 612-18.
- 15 | ASHLEY K, APPLGATE GT, WISE TJ, FERNBACK JE ET AL. - Evaluation of a standardized micro-vacuum sampling method for collection of surface dust. *J Occup Environ Hyg.* 2007 ; 4 (3) : 215-23.
- 16 | BRISSON M, ASHLEY K (Eds) - STP1533-EB Surface and Dermal Sampling. West Conshohocken : ASTM International ; 2011 : 309 p.
- 17 | VERKOUTEREN JR, RITCHIE NW, GILLEN G - Use of force-sensing array films to improve surface wipe sampling. *Environ Sci Process Impacts.* 2013 ; 15 (2) : 373-80.
- 18 | Protocole de mise au point des prélèvements surfaciques et analyse des substances chimiques sur les surfaces de travail. In: MétroPol. INRS, 2019 (www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-analyse-validation-surfaces/metropol-analyse-validation-surfaces.pdf), en ligne début juillet 2019.
- 19 | Principes généraux de ventilation. 4^e édition. Guide pratique de ventilation o. Édition INRS ED 695. Paris : INRS ; 2015 : 39 p.
- 20 | Emploi des matériaux pulvérulents. 2^e édition. Guide pratique de ventilation 17. Édition INRS ED 767. Paris : INRS ; 2003 : 32 p.
- 21 | RICAUD M, CHAZELET S, BELUT E, BEMER D ET AL. - Nanomatériaux. Ventilation et filtration de l'air des lieux de travail. Édition INRS ED 6181. Paris : INRS ; 2014 : 23 p.