

Notes techniques

MESURE EN TEMPS RÉEL DE L'EXPOSITION INDIVIDUELLE AUX NANOPARTICULES SOUS FORME D'AÉROSOLS : PERFORMANCES ET EXEMPLE D'APPLICATION DU DISCMINI

Ces dernières années, l'utilisation de dispositifs individuels de mesure en temps réel, tels le DiSCmini, s'est fortement développée dans le cadre de l'évaluation de l'exposition par inhalation aux nanoparticules. Des travaux de l'INRS ont permis d'évaluer la fiabilité de ces appareils. Cet article présente les résultats d'expérimentations menées en laboratoire et au cours d'une campagne de mesures conduite en entreprise.

SÉBASTIEN
BAU,
RAPHAËL
PAYET,
OLIVIER
WITSCHGER
INRS,
département
Métrologie
des polluants

SABYNE
AUDIGNON
Epicene,
Bordeaux
Population
Health Center,
Inserm U1219

LOUIS GALEY
Laboratoire
parisien de
psychologie
sociale,
université
de Paris –
Nanterre

Parce qu'il permet d'apprécier un risque, de hiérarchiser ou dimensionner les actions à mener en vue de réduire ce risque, le mesurage de polluants chimiques ou biologiques au poste de travail est une étape clé dans une démarche de prévention [1].

Les techniques de mesure en temps réel des expositions professionnelles aux aérosols offrent de nombreux avantages, parmi lesquels la possibilité d'associer un niveau d'exposition à une activité réalisée par un opérateur [2]. Dès lors, ces profils temporels viennent en complément de l'approche classique de mesure des expositions par un prélèvement couplé à une analyse en vue, par exemple, d'une comparaison aux valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) [3], ou afin d'objectiver la présence de particules dans les atmosphères de travail.

Si l'utilisation de la métrologie en temps réel présente également des limites, elle connaît néanmoins un essor important depuis quelques années, en particulier dans le cadre de la problématique des expositions aux particules ultrafines et aux nanomatériaux [4, 5].

Nombreux sont les paramètres permettant de caractériser un aérosol constitué en tout ou partie de particules nanométriques, désignées par l'acronyme « NOAA » (Nano-objets, leurs agglomérats et agrégats). De plus, comme le soulignent Kuhlbusch

et al. [6], la question de la métrique (nombre, surface, masse, volume) à utiliser pour exprimer les concentrations de particules lors de mesures d'exposition est toujours d'actualité. Du fait de sa prévalence historique, la concentration massique peut être déterminée au moyen de méthodes analytiques fiables¹, telle que la gravimétrie ou la spectrométrie de masse. L'introduction d'autres grandeurs peut être justifiée par de meilleures corrélations avec des effets sur la santé, comme c'est le cas pour les fibres, dont les VLEP sont exprimées en nombre de fibres par unité de volume d'air. En l'absence d'études univoques sur les déterminants clés des expositions aux NOAA par inhalation, une approche de caractérisation multi-métrique [7] est adoptée de manière consensuelle, comme c'est le cas en France. À ce titre, la mesure de la concentration en nombre (exprimée en particules/cm³ d'air, notée #/cm³), qui offre une sensibilité de détection des particules submicroniques plus élevée, présente un intérêt. Cette métrique a par exemple été utilisée au Royaume-Uni par le BSI² puis en Allemagne par l'IFA³ dans le cadre de propositions de valeurs guides à des fins d'évaluation des expositions professionnelles aux aérosols de NOAA. Proposer des méthodes de mesure fiables et pertinentes des niveaux d'exposition professionnelle des salariés aux aérosols repose sur une connaissance préalable des performances des instruments de mesure.

RÉSUMÉ

L'utilisation de techniques de mesure en temps réel pour l'objectivation des situations d'exposition professionnelle connaît actuellement un essor. Pour autant, dans bien des cas, les données de calibrage fournies par les fabricants demandent à être complétées vis-à-vis d'aérosols représentatifs de ceux présents dans les atmosphères professionnelles. Apparu sur le marché il y a environ dix ans, l'appareil DiSCmini compte parmi les seuls dispositifs

permettant la mesure en temps réel de l'exposition individuelle aux aérosols de nanoparticules. Des travaux conduits au laboratoire sur treize appareils ont consisté à produire des connaissances relatives aux performances métrologiques de cet appareil. Les données expérimentales, établies dans une large gamme d'aérosols d'essais, indiquent que cet instrument tend à surestimer la concentration de 30 % à 100 %, et à sous-estimer le

diamètre des particules de 20 % à 30 %. Un exemple de mise en œuvre du DiSCmini dans le cadre d'une campagne de mesure de terrain est également proposé et discuté. Au-delà des éléments robustes de caractérisation du DiSCmini, cet article invite également les utilisateurs à avoir une observation critique vis-à-vis des données qui en sont issues, en abordant notamment la question du traitement et de l'interprétation des données.

Real-time measurement of personal exposure to aerosol nanoparticles: performance and example of the DiSCmini application

The use of real-time measurement techniques for objectifying occupational exposure situations is rapidly expanding. However, in many cases, the calibration data provided by manufacturers must be completed by aerosols representative of those present in occupational environments. Appeared on the market about ten years ago, the DiSCmini device is one of the only devices that measures

personal exposure to nanoparticle aerosols in real time. Laboratory work conducted on 13 devices provided knowledge about the metrological performance of the device. The experimental data, established for a large range of test aerosols, indicate that this instrument tends to overestimate concentration by 30 to 100%, and underestimate particle diameter by 20 to 30%. An example of the use

of DiSCmini within the framework of a field measurement campaign is also proposed and discussed. Apart from presenting robust elements characterising DiSCmini, this article also invites users to have a critical observation of the data it produces, addressing in particular the matter of data processing and interpretation.

Or, dans bien des cas, les données de calibrage fournies par les fabricants sont parcellaires et demandent à être complétées par des travaux impliquant des aérosols représentatifs de ceux rencontrés en atmosphères professionnelles. Afin de caractériser au mieux les performances des appareils de mesure destinés à être mis en œuvre lors de campagnes de mesurage en environnement de travail, et ainsi assurer la robustesse et la fiabilité des mesures, des essais sont donc régulièrement conduits en laboratoire, basés sur la maîtrise de la génération d'aérosols. Un second volet, tout aussi important, repose sur un déploiement sur le terrain afin d'évaluer le comportement des instruments face à des aérosols plus complexes.

Le DiSCmini, un appareil individuel pour la mesure des aérosols de nanoparticules

La mesure de référence de la concentration en nombre des particules submicroniques se fait classiquement au moyen de compteurs de noyaux de condensation (CNC), qui détectent optiquement les particules aspirées au sein de l'appareil après les avoir fait croître artificiellement [8]. Ce sont des appareils qui, de par leur conception technique, fonctionnent en position horizontale uniquement,

ce qui ne permet qu'une utilisation à point fixe. À notre connaissance, un seul appareil existe à ce jour pour une utilisation individuelle. Si cet appareil a fait l'objet d'un travail d'évaluation en laboratoire, il demeure cependant nécessaire d'enrichir les retours d'expériences, en raison de son caractère récent et d'une faible diffusion.

L'appareil DiSCmini (pour *Miniature Diffusion Size Classifier*), est apparu sur le marché il y a environ dix ans ; il constitue la version miniaturisée d'un appareil précédent, le meDiSC [9]. Il s'agit à ce jour du seul dispositif individuel permettant la mesure en temps réel de la concentration en nombre et du diamètre modal des particules submicroniques dans la catégorie des chargeurs par diffusion. Le *Tableau 1* regroupe ses principales caractéristiques techniques, fournies par le fabricant et complétées par le retour d'expérience acquis par l'INRS. Il indique que le diamètre modal que peut mesurer l'appareil correspond à une gamme entre 10 nm et 300 nm, qui est volontairement limitée compte tenu de sa conception. En revanche, la concentration en nombre que mesure l'instrument intègre toutes les particules dont le diamètre est inférieur à 700 nm, en raison de la présence d'un sélecteur (impacteur mono-étage) en entrée.



CARACTÉRISTIQUE	VALEUR
Catégorie	Chargeur par diffusion
Débit d'aspiration	1 L/min ± 0,1 L/min
Gamme de concentration en nombre	10 ³ à 10 ⁶ #/cm ³ ± 30 % (particules inférieures à 700 nm)
Gamme de diamètre modal de particule	10 nm à 300 nm ± 30 %
Plage de température de fonctionnement	10 °C – 30 °C
Hygrométrie maximale	< 90 %, idéalement < 70 % (sans condensation)
Fréquence d'acquisition	1 seconde
ΔP admissible	± 2 000 Pa
Dimensions	18 x 9 x 4,2 cm
Poids	700 g
Autonomie de la batterie*	8 heures (peut être réduite à ≈ 4 heures si la température extérieure est < 10 °C)
Limite de quantification*	1,2 fA** soit ≈ 10 ³ #/cm ³ pour des particules de 30 nm, ou 10 ² #/cm ³ pour des particules de 250 nm
Saturation	2 300 fA**, soit ≈ 2 · 10 ⁶ #/cm ³
Temps de réponse à 95 %*	≈ 7 secondes
Capacité de stockage (carte SD)	280 jours (24h/24)

↑ **TABLEAU 1**
Principales caractéristiques techniques du DiSCmini.
* Données INRS
** 10⁻¹⁵ ampère.

Il est également important de noter que la présence de particules de tailles micrométriques ne peut pas être mise en évidence avec l'utilisation d'un DiSCmini. Ainsi, lorsqu'on souhaite décrire au mieux l'ensemble de l'aérosol, il s'avère nécessaire de coupler le DiSCmini avec un autre instrument de mesure, couvrant les particules de taille supérieure à ≈ 0,7 µm, par exemple un compteur optique de particules.

Principe de fonctionnement

Le DiSCmini utilise une détection électrique des particules, en les utilisant comme vecteurs de charges électriques. Cet appareil est donc constitué d'un chargeur unipolaire positif, d'un piège à ions, d'un ensemble de grilles de diffusion, d'un filtre à haute efficacité et d'une pompe interne assurant un débit de prélèvement constant de 1 L/min (Cf. Figure 1). Les particules entrant dans le DiSCmini traversent en premier lieu un étage de sélection constitué d'un impacteur mono-étage, permettant de retirer les particules dont le diamètre est supérieur à 700 nm. Cela protège l'appareil du colmatage, tout en limitant la perturbation des signaux électriques mesurés. Les particules traversent ensuite le chargeur, qui a pour but de les charger positivement afin de leur

conférer un nombre de charges électriques donné en fonction de leur diamètre. De façon à retirer les charges électriques libres produites en excès qui viendraient influencer la mesure, un piège à ions est ensuite disposé dans l'appareil. Les particules, désormais chargées (en vert sur la Figure 1), sont dirigées vers un ensemble de grilles de diffusion, retenant une fraction d'entre elles en fonction de leur taille ; les particules ayant traversé ce jeu de grilles sont finalement totalement collectées sur un filtre de très haute efficacité.

Au sein du DiSCmini, deux courants, liés au nombre de particules, sont mesurés au moyen d'électromètres : le premier courant, noté *i_D*, relevé au niveau des grilles de diffusion, et le second, noté *i_F*, au niveau du filtre terminal.

D'une manière générale, on retiendra que :

- la somme des courants *i_F* + *i_D* est une image de la concentration en nombre des particules ;
- le rapport des courants $\frac{i_F}{i_D}$ est une image de la taille moyenne des particules.

Par ailleurs, pour des raisons de recalibrage interne, le DiSCmini réalise une procédure d'« auto zéro » toutes les heures, sur une durée d'une minute, au cours de laquelle aucune donnée n'est ni mesurée ni enregistrée.

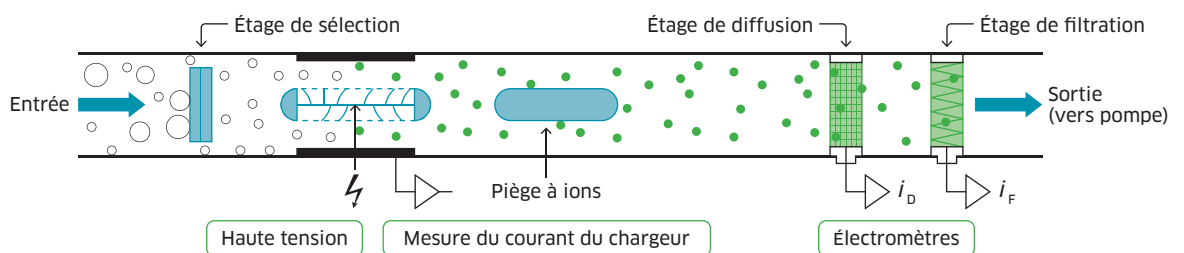
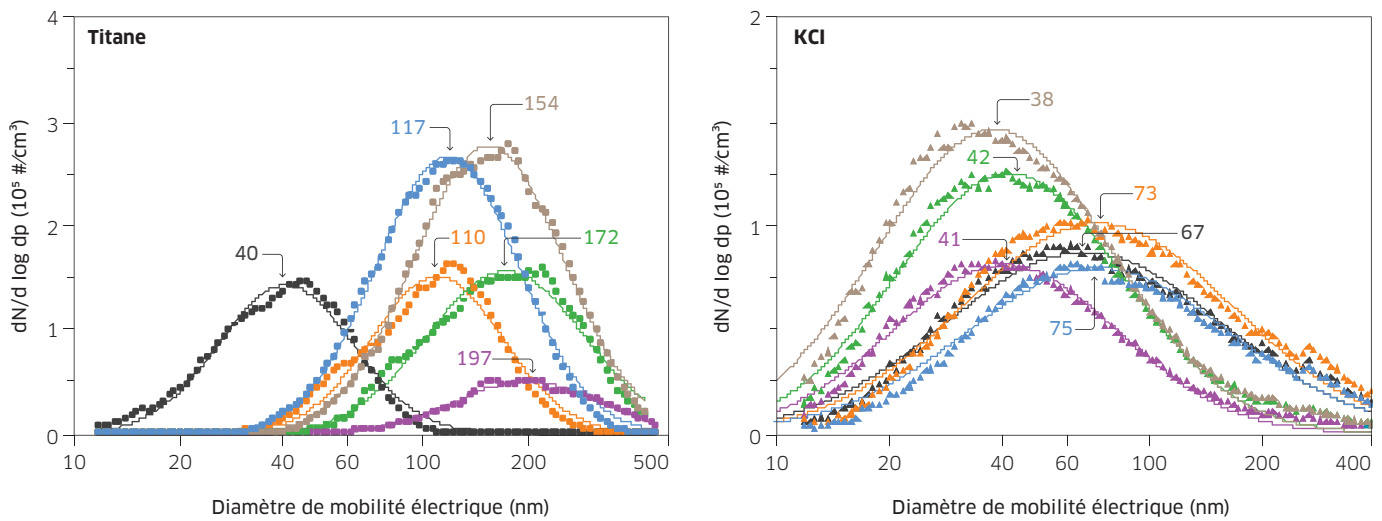


FIGURE 1 → Schéma de principe du DiSCmini (adapté de [10]).



↑ FIGURE 2 Exemples de distributions granulométriques d'aérosols d'essais (les valeurs indiquées correspondent au mode de chacune des distributions par ajustement lognormal).

Pourquoi étudier les performances du DiSCmini ?

Comme souvent, l'étalonnage d'un instrument commercial de mesure en temps réel par un fabricant est limité à un seul aérosol. Pour ce qui est du DiSCmini, il s'agit d'un aérosol de NaCl dont les propriétés peuvent être éloignées de celles des aérosols rencontrés en atmosphères de travail. Il est donc essentiel que les performances de cet appareil soient étudiées plus précisément, notamment vis-à-vis d'aérosols représentatifs de ceux rencontrés sur le terrain. Dans cet objectif, l'INRS a engagé des travaux en laboratoire [11] accompagnés de mesures de terrain, visant à définir le périmètre d'utilisation et les limites de cet instrument de mesure.

Étude en laboratoire

Les travaux conduits au laboratoire visent à produire un corpus de connaissances relatives aux performances de l'appareil DiSCmini. À ce jour, des essais ont été conduits sur treize appareils provenant de neuf laboratoires différents.

Les essais expérimentaux ont consisté à mesurer les caractéristiques (concentration en nombre et distribution granulométrique) des aérosols à l'aide d'instruments de mesure de référence et, en parallèle, avec les DiSCmini étudiés. Pour chaque configuration expérimentale, d'une durée de 15 à 30 minutes, la concentration moyenne ainsi que le diamètre modal moyen mesurés par le DiSCmini sont déterminés. Ces valeurs sont mises en regard de la concentration moyenne de référence et du diamètre modal de l'aérosol généré. Des exemples d'aérosols d'essais produits au laboratoire au moyen de l'installation Caiman [12] sont présentés sur la Figure 2. L'ensemble des aérosols d'essais (216 au total, de huit natures chimiques différentes) couvre une gamme de diamètres modaux de particules de 10 nm à 290 nm et

une plage de concentrations de $\approx 3 \cdot 10^3$ à $\approx 10^6$ #/cm³. Cette grille d'essais a été optimisée de façon à correspondre aux gammes de mesure du DiSCmini indiquées dans le Tableau 1.

Chaque couple de données (mesure DiSCmini, mesure de référence), qu'il s'agisse de la concentration en nombre ou du diamètre des particules, est ensuite utilisé pour déterminer le rapport entre ces grandeurs :

$$\text{Rapport} = \frac{\text{mesure du DiSCmini}}{\text{mesure de référence}}$$

Un rapport égal ou proche de 1 signifie que l'appareil conduit à une mesure équivalente à celle obtenue par l'instrument de référence. En revanche, plus ce rapport s'éloigne de 1, plus la mesure issue du DiSCmini est

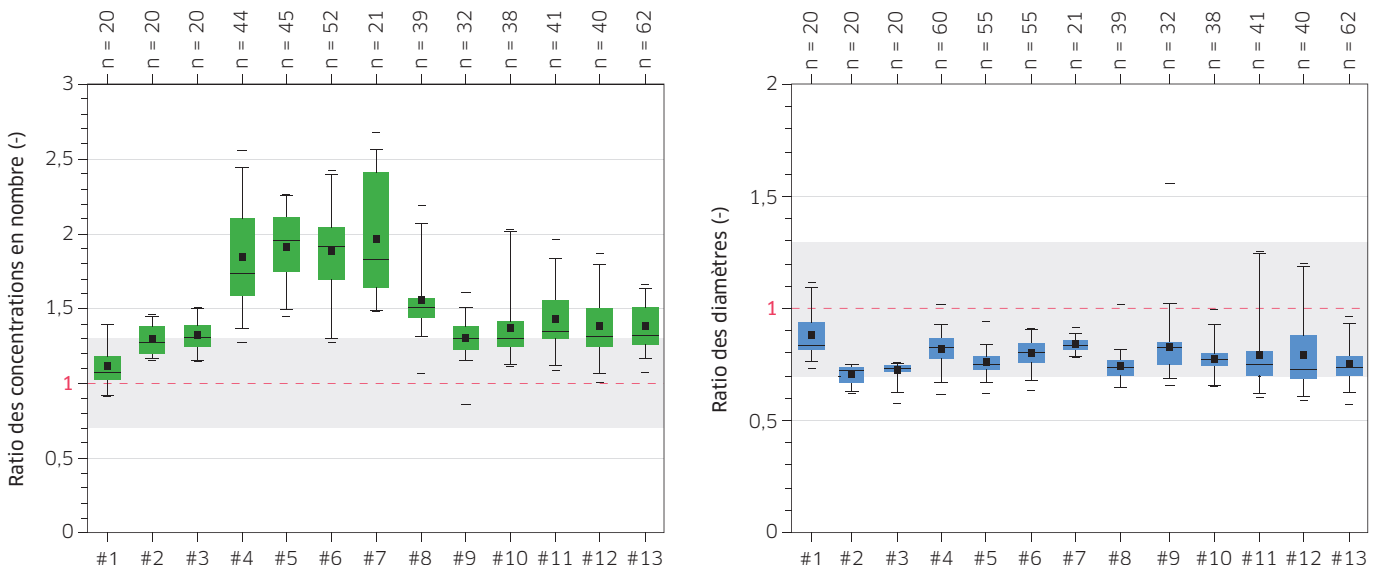
ENCADRÉ

LES « BOÎTES À MOUSTACHES » (BOXPLOT)

Inventée par Tukey en 1977, la « boîte à moustaches » est un outil statistique permettant de représenter schématiquement une distribution. Dans cette représentation, la valeur médiane est encadrée par une boîte correspondant aux premier et troisième quartiles, regroupant ainsi la moitié des valeurs observées. Au-delà de cette boîte, les barres indiquent l'intervalle de confiance à 90 % (du 5^e au 95^e percentile), et les *extrema* (valeurs minimale et maximale) sont également représentés, permettant ainsi la lecture de l'étendue des valeurs.

Ainsi, plus une boîte est petite, plus l'appareil est fidèle, c'est-à-dire que les données sont peu dispersées autour de la valeur médiane. Cette dernière est plus pertinente sur le plan statistique car, contrairement à la moyenne, elle n'est que très peu affectée par les valeurs extrêmes lorsque celles-ci sont peu nombreuses.





↑ FIGURE 3 Résultats de caractérisation au laboratoire des performances des treize DiSCmini.

différente de la valeur de référence. Enfin, un rapport inférieur à 1 signifie que le DiSCmini sous-estime la valeur, tandis qu'un rapport supérieur à 1 indique que le DiSCmini surestime cette valeur.

L'ensemble des rapports obtenus pour chacun des appareils étudiés est alors utilisé pour construire un diagramme sous forme de « boîte à moustaches » (Cf. Encadré), permettant visuellement de décrire les performances de l'instrument. Les résultats obtenus sur treize DiSCmini sont présentés sur la Figure 3, où les zones grisées correspondent à un intervalle de $\pm 30\%$ autour d'un rapport unitaire (Cf. Tableau 1). Le nombre de points expérimentaux considérés pour l'élaboration de chacune des boîtes est indiqué au-dessus.

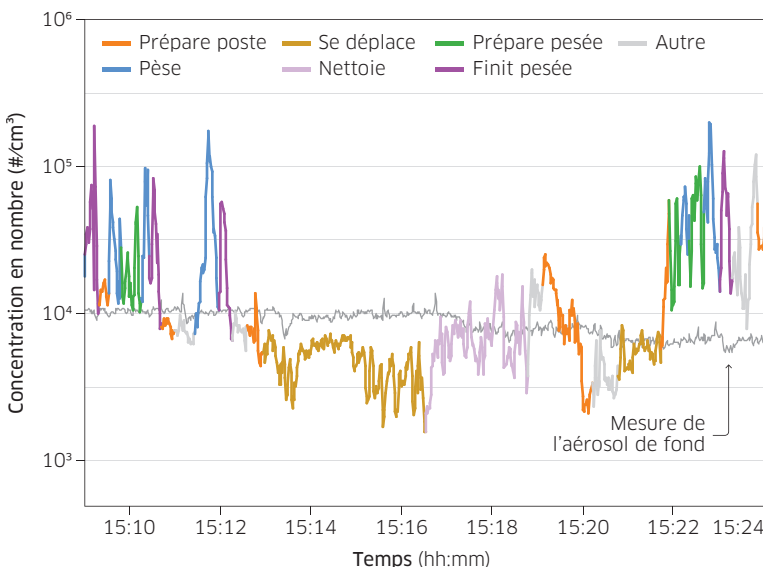
D'une manière générale, il ressort des résultats expérimentaux que le DiSCmini tend à surestimer la

concentration en nombre des particules (les boîtes à moustaches sont au-dessus de 1) et à sous-estimer leur diamètre modal. Plus précisément, sur les treize modèles étudiés, les rapports de concentrations médians s'échelonnent entre 1,08 (DiSCmini #1) et 1,95 (DiSCmini #5) et les écarts observés sont assez variables d'un modèle à l'autre. Les rapports de diamètres modaux, dont les médianes s'étendent entre 0,73 et 0,84, sont globalement équivalents, quel que soit l'instrument considéré. Toutefois, les intervalles de confiance sont suffisamment faibles pour pouvoir considérer le DiSCmini comme un instrument de mesure fidèle.

Ainsi, puisque les rapports ne sont pas strictement égaux à 1, il est attendu que la mesure issue d'un DiSCmini soit associée à un biais systématique, aussi bien en matière de surestimation de la concentration en nombre ($\approx 50\%$ en moyenne sur l'ensemble des appareils étudiés) que de sous-estimation du diamètre modal des particules ($\approx 20\%$ en moyenne). Ces observations sont quelque peu différentes des spécifications de $\pm 30\%$ indiquées par le constructeur (Cf. Tableau 1), en particulier en ce qui concerne la concentration en nombre.

Ces résultats montrent l'importance de procéder à des essais de caractérisation en laboratoire des performances des instruments de mesure, en supplément des données constructeur, avant une utilisation en environnement de travail. En particulier, lorsque deux modèles de DiSCmini sont mis en œuvre en parallèle (par exemple, à deux endroits d'un atelier), il est important de vérifier si un biais systématique existe entre ces deux appareils, et d'en connaître l'ordre de grandeur. Ce point a déjà été évoqué dans un article précédent portant sur les performances des CNC [13]. Pour autant, l'existence de biais systématiques ne doit pas être considérée comme un frein à l'utilisation

↓ FIGURE 4 Exemple de profil temporel associé à une analyse de l'activité.



INTITULÉ	DESCRIPTION
Prépare poste	L'opérateur interagit avec l'ordinateur, met en place un nouveau sac, change de support de sac...
Prépare pesée	L'opérateur récupère et ouvre de nouveaux sacs de matière première à peser. Des bacs de poudre peuvent être transportés.
Pèse	L'opérateur pèse à partir de sacs de 15 kg à 25 kg ou de big bags.
Finit pesée	L'opérateur ferme le sac pesé en réalisant un nœud.
Se déplace	L'opérateur se déplace à pied ou en chariot électrique.
Nettoie	L'opérateur nettoie le poste de travail avec un balai.
Autre	Ensemble des actions ne rentrant dans aucune des catégories décrites ci-dessus.

← TABLEAU 2
Thésaurus
et description
des actions
de l'opérateur.

de ces appareils lorsqu'ils sont mis en œuvre à des fins d'objectiver les expositions professionnelles aux aérosols de nanoparticules. En effet, dans la majorité des cas, les profils temporels mesurés sont interprétés de façon relative, dans le temps ou dans l'espace. Par exemple, il sera possible d'affirmer que le niveau de concentration relevé durant l'activité B est x fois plus élevé que durant l'activité A ou, de la même manière, x fois plus faible au point C qu'au point D.

Exemple de mise en œuvre du DiSCmini en environnement professionnel

Dans l'exemple d'utilisation du DiSCmini qui est présenté ici, seules les concentrations en nombre des aérosols ont été représentées, afin d'en faciliter la lecture. De façon équivalente, les profils temporels issus des mesures en temps réel du diamètre modal des particules peuvent également être représentés en vue de compléter l'interprétation des données. La concentration en nombre de particules relevée par le DiSCmini sur opérateur lors d'une opération de pesée de poudres est présentée sur la *Figure 4*. Ces mesures ont été réalisées dans le cadre du projet de recherche ExproPNano⁴, financé par l'Anses, auquel l'INRS a contribué. Sur ce profil temporel est également représentée la concentration en nombre de l'aérosol, mesurée simultanément à l'aide d'un autre DiSCmini à un point de référence, choisi de façon à ne pas être impacté par les activités effectuées par l'opérateur ; cette série de données est dénommée « aérosol de fond ». Les travaux préliminaires conduits au laboratoire ont permis d'établir une bonne corrélation (écarts relatifs inférieurs à 20 %) entre les deux modèles mis en œuvre ici. Dans un souci de lisibilité, le profil temporel de la *Figure 4* est volontairement resserré sur une période de temps courte, de l'ordre de 15 minutes, car l'opération s'accompagne d'une analyse détaillée de l'activité réalisée par VEM (*Video Exposure Monitoring*) au moyen de l'outil Captiv[®] (Centrale d'acquisition de la pollution au travail informé par vidéo) développé par l'INRS [14], tel que décrit dans une proposition récente émanant du retour d'expérience capitalisé dans le cadre du projet ExproPNano [15]. Ainsi, au cours du

poste, les activités conduites par l'opérateur ont été observées et classées en différentes catégories selon le thésaurus détaillé dans le *Tableau 2*, correspondant aux différentes couleurs. Dès lors, cette description offre la possibilité de déterminer, sur un poste donné, les actions qui sont corrélées aux niveaux d'expositions les plus élevés, et de mettre en place des actions de prévention adaptées. Il convient de noter que le pas de temps minimal utilisé pour le codage des activités, se doit d'être cohérent avec le temps de réponse de l'appareil. Pour le DiSCmini, dont le temps de réponse est de l'ordre de 7 secondes (*Cf. Tableau 1*), un pas de temps de 10 secondes a été choisi.

La *Figure 4* révèle que les activités regroupées sous les intitulés « pèse » (en bleu) et « finit pesée » (en violet) correspondent aux niveaux de concentration les plus élevés. Sur la durée totale du poste suivi (1h30), ces activités représentent près de 50 % du temps, et les concentrations relevées sont environ sept fois supérieures à celles relevées au niveau de l'aérosol de fond, moyennées sur la durée de l'opération ($\approx 10^4 \text{ \#}/\text{cm}^3$). De même, l'activité dénommée « prépare pesée » (en vert), correspondant à 11 % du temps, conduit à des mesures de concentration en nombre de l'ordre de deux fois celles de l'aérosol de fond. À l'inverse, lors des déplacements de l'opérateur sur son poste (en jaune), la concentration mesurée est équivalente à celle obtenue pour l'aérosol de fond. En vue de réduire les expositions professionnelles sur le poste investigué, des préconisations pourraient être faites, telles que la mise en place d'une torche aspirante au niveau de la pesée des poudres, ou encore l'utilisation d'un équipement de protection individuelle durant les opérations les plus exposantes.

Conclusion

S'il constitue le seul instrument individuel permettant de mesurer en temps réel la concentration en nombre des aérosols submicroniques et simultanément leur diamètre modal, le DiSCmini ne permet pas, à lui seul, de rendre compte de l'exposition d'un travailleur aux aérosols. Étant donné sa gamme de mesures de concentrations en nombre, limitée à la fraction de particules inférieures à 700 nm, il pourra



être accompagné d'instruments couvrant une gamme de tailles complémentaire, tels que les compteurs optiques de particules, les photomètres, ou encore certains capteurs d'aérosols à bas coût, développés plus récemment.

Associée à la mise en œuvre de prélèvements conventionnels couplés à une analyse ultérieure (gravimétrique et/ou chimique), la métrologie en temps réel au poste de travail permet, comme nous l'avons décrit au cours de cet article, de compléter la caractérisation des expositions professionnelles aux aérosols. De telles mesures servent alors à identifier les phases de l'activité de travail (cas d'un profil temporel) ou, de manière similaire, les lieux (dans le cas d'un profil spatial) où la concentration des aérosols est plus élevée. Cette connaissance compte parmi les éléments de choix des périodes ou des points de prélèvement à caractériser dans le cadre de campagnes de mesurage plus complètes.

Il appartient à l'utilisateur de considérer les performances ainsi que les limites d'utilisation de la métrologie en temps réel utilisée et de veiller à réaliser une interprétation critique des données qui en sont issues. En parallèle, il est important que des laboratoires de métrologie poursuivent la production de données pertinentes et fiables permettant de caractériser le

comportement, les performances et le périmètre d'utilisation de différentes familles d'instruments.

Enfin, le recours à l'utilisation d'appareils de mesure en temps réel n'a d'intérêt que s'il est accompagné d'une observation pertinente, de façon à ce que la mesure puisse être corrélée à une localisation, une activité, une phase de fonctionnement d'un procédé, un événement, etc. Cette observation peut être réalisée à l'aide d'un outil de type VEM (associant vidéo et mesure) comme illustré ici, mais également au travers d'une observation adéquate avec retranscription manuscrite, pour autant que celle-ci suive un protocole bien défini. ●

1. La base de données MétroPol, développée par l'INRS (www.inrs.fr/publications/bdd/metropol.html) regroupe un ensemble complet de protocoles et de méthodes robustes, validées et reconnues.

2. BSI (2007) – Nanotechnologies – Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials, PD 6699-2:2007.

3. IFA – Criteria for assessment of the effectiveness of protective measures, 2009. Voir : www.dguv.de/ifa (décembre 2020).

4. Évaluation des expositions professionnelles aux particules nanométriques : développement et mise en œuvre d'une stratégie opérationnelle d'évaluation des expositions professionnelles aux particules nanométriques articulant le mesurage à l'analyse de l'activité, projet Anses n° EST-2014/1/162.

BIBLIOGRAPHIE

[1] COURRIER B. – La mesure : intérêts et limites dans la démarche de prévention du risque chimique. *Hygiène et sécurité du travail*, 2020, 260, pp. 24-30. Accessible sur : www.hst.fr.

[2] BAU S., WITSCHGER O., GALLAND B., MARTIN P. – Métrologie en temps réel de substances chimiques au poste de travail: intérêts et limites. *Hygiène et sécurité du travail*, 2015, 239, pp. 6-10. Accessible sur : www.hst.fr.

[3] INRS – Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. ED 984, 2016. Accessible sur : www.inrs.fr.

[4] OECD – Harmonized tiered approach to measure and assess the potential exposure to airborne emissions of engineered nano-objects and their agglomerates and aggregates at workplaces. *ENV/JM/MONO(2015)19*, 2015, 55, p. 51.

[5] WITSCHGER O., LE BIHAN O., REYNIER M., ET AL. – Préconisations en matière de caractérisation des potentiels d'émission et d'exposition professionnelle aux aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux. *Hygiène et sécurité du travail*, 2012, 226, pp. 41-55. Accessible sur : www.hst.fr.

[6] KUHLEBUSCH T.A., WIJNHOFEN S.W.P., HAASE A. – Nanomaterial exposures for worker, consumer and the general public. *NanoImpact*, 2018, 10, pp. 11-25.

[7] O'SHAUGHNESSY P.T. – Occupational health risk to nanoparticulate exposure. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, 15, pp. 49-62.

[8] BAU S., WITSCHGER O. – Mesure en temps réel de la concentration en nombre d'un aérosol submicronique au moyen d'un compteur de noyaux de condensation. Guide méthodologique MétroPol, 2019.

[9] BAU S., JACOBY J., WITSCHGER O. – Evaluation of the diffusion size classifier (meDiSC) for the real-time measurement of particle size and number concentration of nanoaerosols in the range 20-700 nm. *J. Environ. Monit.*, 2012, 14, pp. 1014-1023.

[10] FIERZ M., HOULE C., STEIGMEIER P., BURTSCHER H. – Design, calibration, and field performance of a Miniature Diffusion Size Classifier. *Aerosol Science and Technology*, 2011, 45, pp. 1-10.

[11] BAU S., WITSCHGER O. – Étude en laboratoire des performances de l'appareil DiSCmini pour la mesure des aérosols submicroniques. Les notes scientifiques

et techniques de l'INRS, 2015, NS 337. Accessible sur : www.inrs.fr.

[12] JACOBY J., BAU S., WITSCHGER O. – CAIMAN: a versatile facility to produce aerosols of nanoparticles. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, 304, 012014.

[13] BAU S., PAYET R., WITSCHGER O. – Une nouvelle méthodologie pour vérifier les compteurs de noyaux de condensation. *Hygiène et sécurité du travail*, 2017, 247, pp. 56-61. Accessible sur : www.hst.fr.

[14] MARTIN P., BRAND F., SERVAIS M. – Correlation of the exposure to a pollutant with a task-related action or workplace: The CAPTIV™ System. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1999, 43, pp. 221-233.

[15] GALEY L., AUDIGNON-DURAND S., BROCHARD P., ET AL. – Vers une méthode opérationnelle d'évaluation de l'exposition aux aérosols de nanoparticules par l'intégration de l'activité de travail à la mesure. *Archives des maladies professionnelles et de l'environnement*, 2020, 81, pp. 838-850.