

Notes techniques

PROPOSITION DE CLASSIFICATION DE LA PULVÉRULENCE DES POUDRES PAR LA MÉTHODE DE L'AGITATEUR VORTEX

Dans le cadre de l'évaluation des risques chimiques liés à l'exposition par inhalation, la pulvérulence des matériaux manipulés à l'état de poudres est un élément déterminant en matière de prévention. Afin de fournir aux préventeurs des informations sur les émissions d'aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des matériaux en vrac, l'INRS et le CEA proposent dans cet article une classification des indices de pulvérulence mesurés à partir de la méthode de l'agitateur vortex.

SÉBASTIEN
BAU
INRS,
département
Métrologie
des polluants

JOSÉPHINE
STECK,
MAËLIS
VAYSSIÉ,
BASTIEN
PELLEGRIN,
SÉBASTIEN
JACQUINOT
Commissariat
à l'énergie
atomique et
aux énergies
alternatives
(CEA)

L'évaluation des risques chimiques est une démarche clé pour la prévention des risques professionnels. Son objectif est de contribuer à la sécurité des travailleurs en identifiant les risques chimiques et en mettant en place des actions de prévention appropriées. Cette évaluation doit être formalisée dans le document unique d'évaluation des risques professionnels¹. L'outil Seirich² déve-

loppé par l'INRS permet de réaliser cette évaluation du risque chimique. Elle suit plusieurs étapes structurées qui sont rappelées ci-dessous [1] :

- tous les produits chimiques utilisés ou générés sont exhaustivement répertoriés par zone et tâche de travail en prenant en compte tous leurs états physiques (solides, liquides, gazeux). Pour chaque produit chimique, il est essentiel d'identifier les dangers associés, à partir des fiches de données de

RÉSUMÉ

La pulvérulence, qui représente la capacité d'une poudre à émettre un aérosol, est un facteur clé d'exposition par inhalation aux substances chimiques. Sa connaissance contribue à la prévention du risque chimique : choix des matériaux les moins émissifs, dimensionnement des protections collectives, hiérarchisation des risques chimiques, intégration dans des outils d'évaluation des risques. Dans cet article, l'INRS et le CEA proposent de définir quatre classes de pulvérulence (de très faible à élevée) à partir des indices mesurés par la méthode de l'agitateur vortex. Cette classification, issue de l'analyse de plus de 160 poudres, permet d'évaluer le potentiel d'émission d'aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des matériaux en vrac.

PROPOSAL FOR CLASSIFICATION OF FLOWABILITY OF POWDERS BY THE VORTEX AGITATOR METHOD

Flowability, which represents the capacity of a powder to emit an aerosol, is a key factor in inhalation exposure to chemicals. Its characterisation contributes to the prevention of chemical risks: choice of the least emissive materials, scaling of collective protection, ranking of chemical risks, integration of risk assessment tools. In this article, INRS and CEA (the French Commissariat for Alternative Energies) propose a definition of four flowability classes (from very low to high) linked to indexes measured using the vortex agitator method. This classification, based on the analysis of over 160 powders, can be used to assess potential aerosol emissions during operations involving bulk materials.



© Serge Marillon pour l'INRS / 2021

- sécurité (FDS) ou encore de bases de données telles que celle de l'ECHA (*European CHemicals Agency*) ;
- il est indispensable de déterminer par quelle(s) voie(s) les travailleurs peuvent être exposés aux produits chimiques (inhalation, ingestion ou contact/passage cutané), ainsi que la quantité mise en œuvre ;
 - une fois l'exposition identifiée, il convient de déterminer le niveau de risque (combinaison du danger et de l'exposition) pour chaque produit chimique ;
 - l'évaluation du risque résiduel repose sur le danger, le procédé mis en œuvre, la durée, la quantité des substances utilisées, leur volatilité, les moyens de protection collective. Cette étape permet de déterminer si les mesures existantes sont suffisantes ou si des ajustements doivent être faits ;
 - enfin, les risques sont hiérarchisés en fonction de leur gravité et de leur probabilité, afin d'établir un plan d'action. Ce dernier a pour objectif de réduire les risques à un niveau aussi bas que possible, en mettant en place des mesures de prévention et en s'assurant de leur efficacité.

Des mesures de prévention peuvent être étudiées et évaluées à l'aide d'outils spécifiques tels que les fiches d'aides au repérage (FAR) et à la substitution (FAS)³, le logiciel ProtecPo⁴ pour aider à la sélection des matériaux de protection cutanée, l'outil Mixie

pour évaluer les polyexpositions chimiques⁵, ou encore la liste SIN (*Substitute It Now*) qui propose des aides à la substitution⁶.

Un aspect particulièrement délicat de l'évaluation des risques liés à l'exposition par inhalation concerne la volatilité des produits chimiques. Si celle-ci est évaluée pour les solvants par l'intermédiaire de la pression de vapeur saturante ou de leur température d'ébullition [1], l'exposition par inhalation liée à la manipulation de matériaux en poudre (par exemple lors du transvasement, de la pesée, du mélange...) est plus complexe. Dans ce cas, on parlera de pulvéulence, qui représente la capacité d'une poudre à générer un aérosol à la suite d'une sollicitation mécanique (chute, vibration, fluidisation) [2]. Également appelée pouvoir de resuspension, la pulvéulence des matériaux solides en vrac vise à fournir aux utilisateurs des informations sur leur potentiel d'empoussièrement lorsqu'ils sont manipulés sur les lieux de travail.

Pour évaluer la capacité d'un matériau solide à émettre des poussières, et *in fine* le risque de dispersion dans l'air, la granulométrie (poudres fines *vs* matériaux plus grossiers) des matériaux en poudre et/ou sous d'autres formes (poussières, fibres, granules, pastilles, etc.) est actuellement utilisée [1,3,4]. Cette approche peut être améliorée en évaluant la

Quantification de la pulvéulence des matériaux par la méthode de l'agitateur vortex dans un laboratoire de l'INRS.



capacité d'une poudre à être mise en suspension *via* une mesure expérimentale d'indices de pulvé-
rulence, suivant des méthodes d'essais dédiées.

**La mesure de la pulvé-
rulence des poudres
par la méthode de l'agitateur vortex**

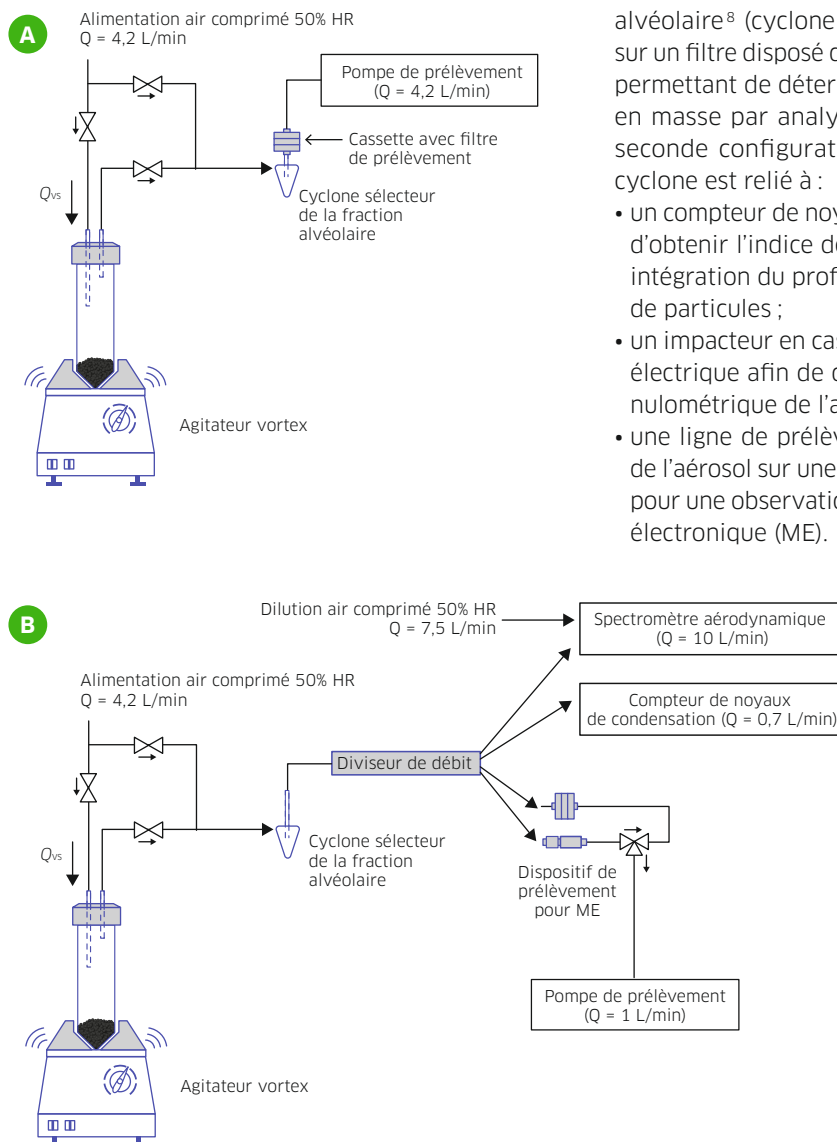
Différentes méthodes de mesure de pulvé-
rulence co-existent [5]. La méthode retenue doit être choisie
soigneusement afin d'être représentative du scé-
nario d'utilisation visé. Complémentaire à d'autres
méthodes de mesure de la pulvé-
rulence, la méthode dite de l'agitateur vortex (selon la norme NF EN
17199-5 de novembre 2025⁷) a été initialement
développée pour être appliquée aux nanomatériaux
[6]. Par conséquent, et conformément aux précon-
isations relatives à la mise en œuvre de nanomaté-
riaux [7], c'est la fraction alvéolaire de l'aérosol qui
est sélectionnée pour être analysée. En raison des
fortes sollicitations mécaniques impliquées, cette
méthode est souvent considérée comme majorante.

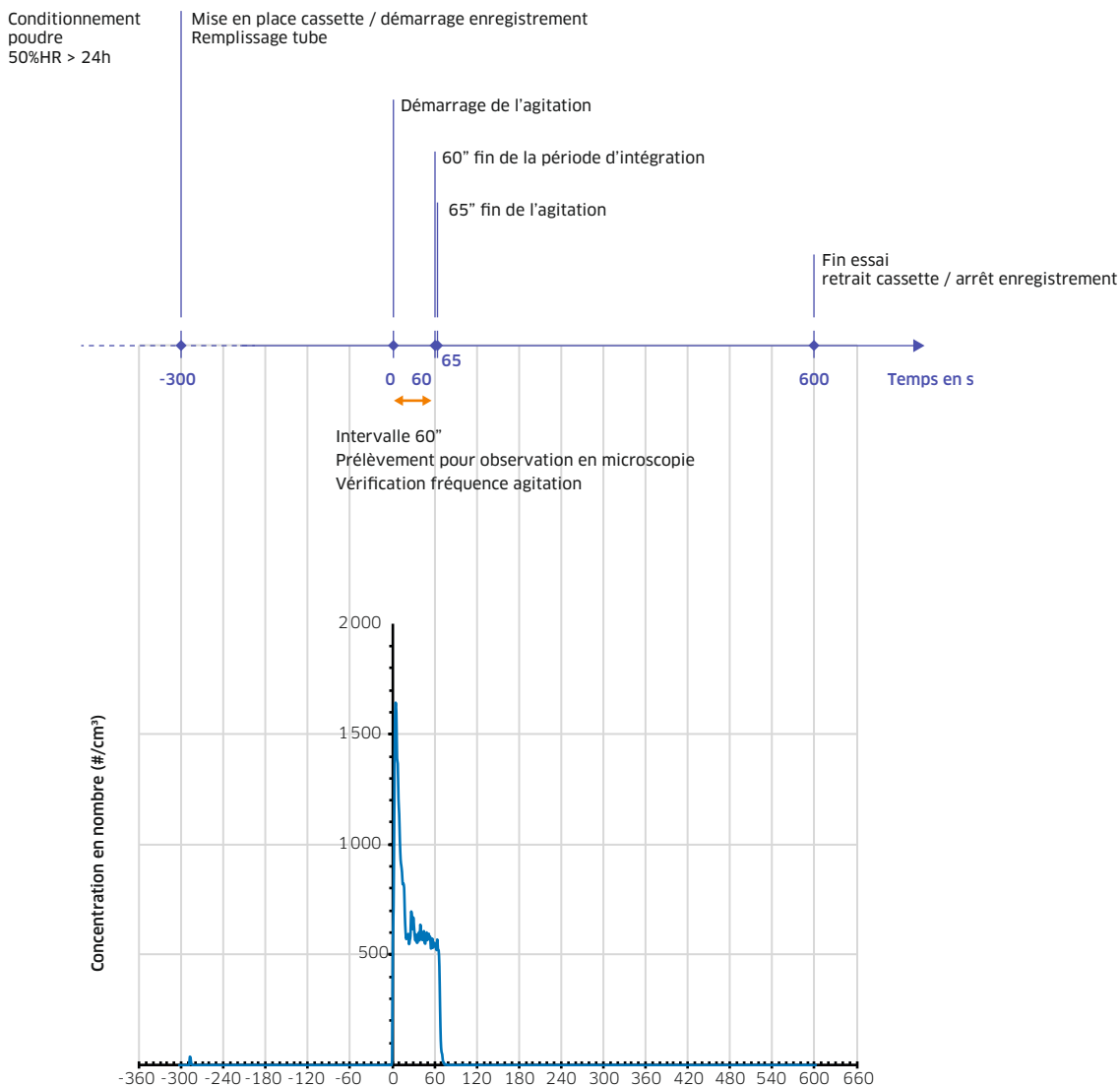
Elle est pertinente pour la simulation des scénarios
défavorables de type nettoyage de poste, vibration
durant un transport de poudres, voire situations
accidentelles. Des mesures de pulvé-
rulence ont été effectuées sur de nombreuses substances en utili-
sant cette méthode, qu'il s'agisse de nanomatériaux
ou non.

La méthode de l'agitateur vortex (VS pour *vortex
shaker*) utilise un tube cylindrique en acier inoxy-
dable avec fond conique agité par un vortex (*IKA
Vortex Genius 3*) dans lequel le matériau en poudre
testé est placé (0,5 cm³ de poudre). L'échantillon
est conditionné à 50 ± 5 % d'humidité relative, au
moins 24 heures avant l'expérience. Le cylindre
est secoué pendant 65 secondes selon un mou-
vement orbital circulaire (amplitude de déplace-
ment 4 mm, vitesse de rotation 1800 rpm). De l'air
propre (filtre à très haute efficacité) et contrôlé
à 50 ± 5 % d'humidité relative pour une tempé-
rature de 21 ± 3 °C est introduit à un débit de
4,2 L/min dans le cylindre et entraîne l'aérosol. Ce
dernier traverse un cyclone sélectionnant la fraction
alvéolaire⁸ (cyclone GK2.69) avant d'être collecté
sur un filtre disposé dans une cassette (*Cf. Figure 1A*),
permettant de déterminer l'indice de pulvé-
rulence en masse par analyse gravimétrique⁹. Dans une
seconde configuration (*Cf. Figure 1B*), l'aval du
cyclone est relié à :

- un compteur de noyaux de condensation¹⁰ en vue
d'obtenir l'indice de pulvé-
rulence en nombre par
intégration du profil de concentration en nombre
de particules ;
- un impacteur en cascade basse pression à mesure
électrique afin de déterminer la distribution gran-
ulométrique de l'aérosol [8-9] ;
- une ligne de prélèvement permettant la collecte
de l'aérosol sur une courte durée (5 à 10 secondes)
pour une observation subséquente en microscopie
électronique (ME).

FIGURE 1 →
Banc d'essais pour
la mesure
de la pulvé-
rulence
des poudres
par la méthode
de l'agitateur
vortex :
A : configuration
prélèvement.
B : configuration
mesures en
temps réel.





← FIGURE 2
Séquence d'un
essai de mesure
de pulvéulence
et exemple d'un
profil temporel
de concentration
en particules
pour une poudre
utilisée en cabine
de peinture.

La configuration expérimentale du dispositif de mesure (Cf. Figures 1A et 1B) est donc modifiée en aval, en fonction des paramètres requis. Pour une substance donnée, trois essais sont réalisés pour chacune des deux configurations. Les valeurs retenues (indices de pulvéulence en masse et en nombre, distribution granulométrique) correspondent à la moyenne et à l'écart-type de ces triplicats. La séquence expérimentale d'un essai est détaillée sur la Figure 2 (partie haute).

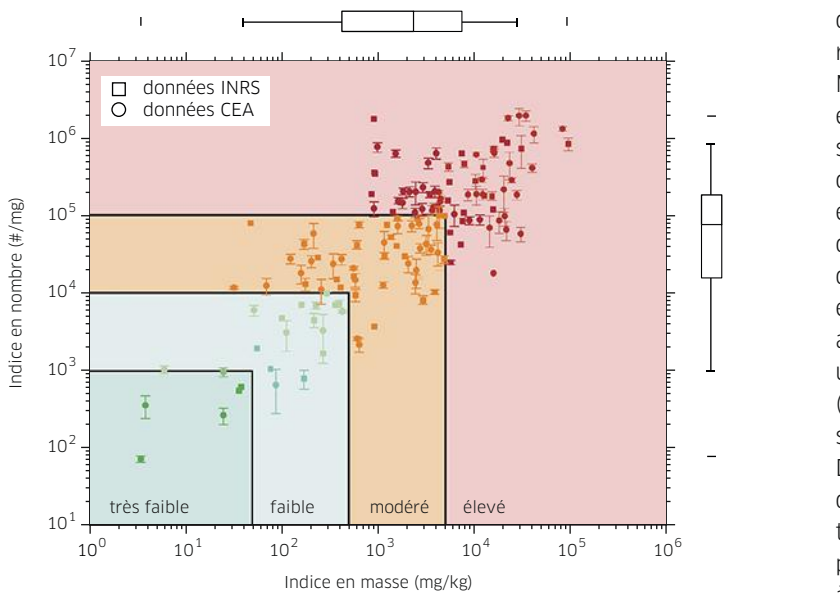
La partie basse de la Figure 2 présente un exemple de profil temporel de concentration en nombre obtenu pour une poudre utilisée en cabine de peinture. À l'instant initial ($T=0$), correspondant au démarrage de l'agitation, un pic d'émission est observé : la concentration en nombre des particules passe subitement de 0 particules/cm³ d'air (#/cm³) à plus de 1500 #/cm³, avant de se stabiliser à un niveau proche de 500 #/cm³. À la fin de l'agitation ($T = 65$ secondes), la concentration des particules

chute et revient au niveau initial voisin de 0 #/cm³. Ce profil peut être très variable d'une poudre à une autre, tout comme les niveaux de concentration enregistrés.

L'indice de pulvéulence en masse en fraction alvéolaire s'exprime en milligrammes d'aérosol par kilogramme de poudre (mg/kg) ; il est déterminé en divisant la masse recueillie sur le filtre (en milligrammes : mg) par la masse de poudre placée dans le tube cylindrique (en kilogrammes : kg).

L'indice de pulvéulence en nombre en fraction alvéolaire s'exprime en nombre de particules par milligramme de poudre (#/mg). Il est obtenu en divisant le nombre cumulé de particules émises sur les premières 60 secondes de vibration par la masse de poudre placée dans le tube cylindrique (en mg). Les coefficients de variation (écart-type/moyenne) observés sont inférieurs à 30 % pour 75 % des indices en masse et pour plus de 80 % des indices en nombre issus des mesures réalisées sur près





↑ FIGURE 3 Indices de pulvéulence en fraction alvéolaire (en masse et en nombre) mesurés sur plus de 160 poudres par l'INRS et le CEA.

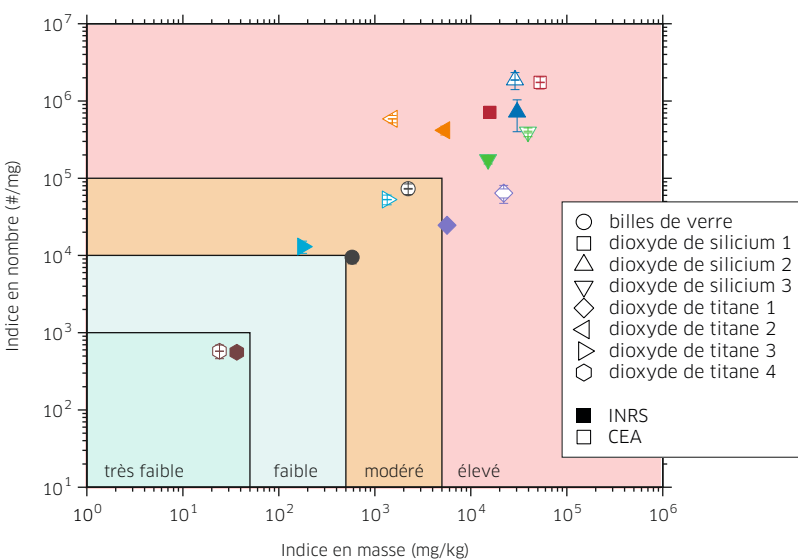
de 160 matériaux différents, ce qui démontre une répétabilité satisfaisante pour les trois essais. Même si elle n'est pas requise dans la norme, il est proposé de quantifier la proportion que représente la fraction analysée (i.e., la fraction alvéolaire de l'aérosol par rapport à l'ensemble de l'aérosol émis en sortie du cylindre), en raison de la présence d'un sélecteur de la fraction alvéolaire dans le banc d'essais. L'interprétation des résultats doit être faite en tenant compte de ce que représente la fraction analysée. Par exemple, pour les aérosols comportant une proportion importante de particules grossières (de diamètres supérieurs à 10 µm), la fraction analysée représente moins de 20 % [10] de l'aérosol émis. De plus, la mesure de la distribution granulométrique de l'aérosol est également réalisée en aval du sélecteur de la fraction alvéolaire. Pour cette raison, il n'est pas possible de mesurer des particules supérieures à environ 6 µm. Les observations en microscopie électronique des prélèvements réalisés dans la configuration B permettent de démontrer la présence de NOAA (nano-objets, leurs agrégats et agglomérats).

CLASSE DE PULVÉULENCE	INDICE EN NOMBRE (#/mg)	INDICE EN MASSE (mg/kg)	EXEMPLE DE POUDRE
Très faible	< 10 ³	< 50	Café moulu
Faible	10 ³ - 10 ⁴	50 - 500	Sucre glace
Modérée	10 ⁴ - 10 ⁵	500 - 5000	Cannelle
Élevée	> 10 ⁵	> 5000	Ciment

↑ TABLEAU 1 Seuils proposés pour les quatre classes de pulvéulence par la méthode de l'agitateur vortex.

Proposition de classes de pulvéulence

Contrairement aux deux méthodes historiques (tambour rotatif – norme NF EN 15051-2+A1¹¹ – et chute continue – norme NF EN 15051-3¹²), la méthode de l'agitateur vortex ne permet pas à ce jour de catégoriser les matériaux sous forme de poudre selon différentes classes de pulvéulence (très faible, faible, modéré, élevé). Face à ce constat, l'INRS et le CEA (établissement de Grenoble) ont mis en commun leurs bases de données d'indices de pulvéulence afin de proposer des classes. Plus de 160 matériaux en poudre (dont près de 50 % identifiés comme nanomatériaux) constituent cette base. Ces poudres proviennent principalement de recherches en lien avec la sécurité des nanomatériaux, y compris les plus couramment utilisés en France¹³, ainsi que des poudres issues de produits du quotidien (14 au total, parmi lesquelles figurent : ciment, talc, cannelle, mortier, craie). Certaines familles de poudres se distinguent, telles que les dioxydes de titane (TiO₂, 17 poudres), les dioxydes de silicium (SiO₂, huit poudres), les ciments (sept poudres), ou encore différentes formes de poudres carbonées (noirs de carbone : quatre poudres, nanotubes de carbone : quatre poudres, nanofibres de carbone : trois poudres). La Figure 3 présente les indices de pulvéulence (fraction alvéolaire) en nombre (axe des ordonnées) et en masse (axe des abscisses) mesurés sur l'ensemble de ces substances. Il est intéressant de mentionner que les indices de pulvéulence couvrent près de cinq ordres de grandeur, de 3 mg/kg à plus de 90 000 mg/kg pour l'indice en masse, et de 70 #/mg à près de 2×10⁶ #/mg pour l'indice en nombre. Les données présentées suggèrent qu'il



↑ FIGURE 4 Comparaison des indices de pulvéulence en nombre et en masse obtenus pour huit poudres communes par l'INRS (symboles pleins) et le CEA (symboles creux).

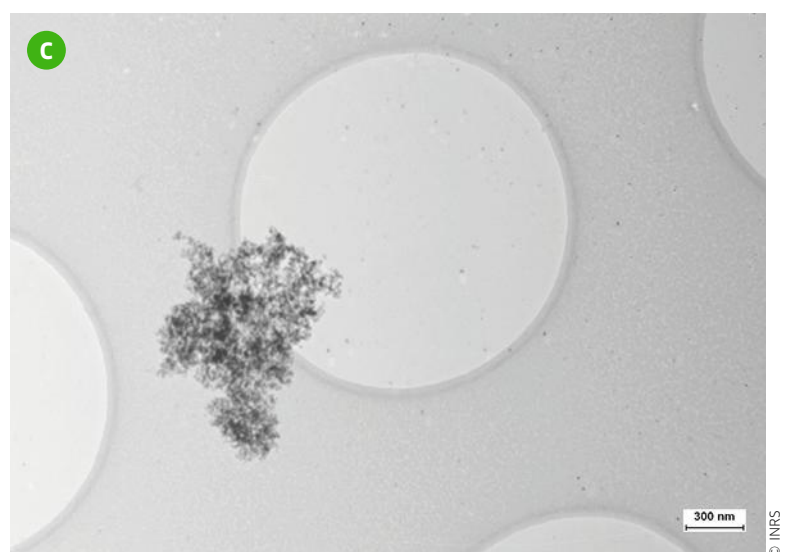
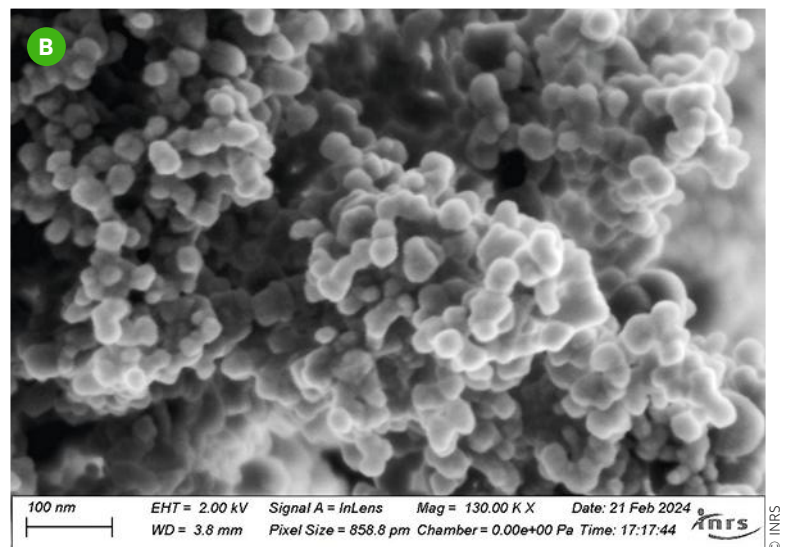
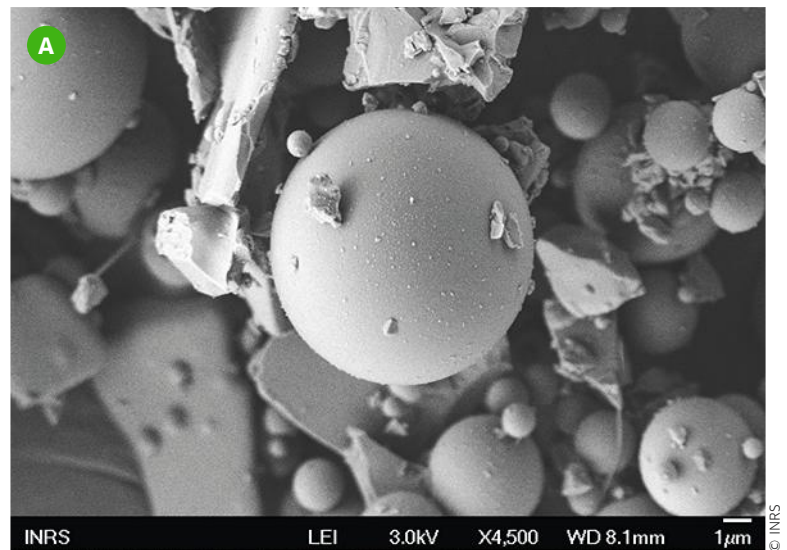
existe une tendance linéaire entre ces deux indices ; si l'on multiplie par un facteur 10 l'indice de pulvéulence en masse, on multiplie également par un facteur de l'ordre de 10 l'indice de pulvéulence en nombre. Enfin, les « boîtes à moustaches » des indices sont également représentées, à l'extérieur du graphe (à droite, en nombre ; en haut, en masse), montrant la répartition des indices de pulvéulence observés sur l'ensemble des matériaux considérés.

À partir de ces données, quatre classes de pulvéulence associées à la méthode de l'agitateur vortex et combinant les indices en nombre et en masse peuvent être proposées. Disposer d'une telle échelle permet d'évaluer plus précisément les risques d'émission de particules dans l'air et de pouvoir prévenir l'inhalation de substances chimiques, en renforçant la protection des travailleurs qui produisent ou manipulent ces poudres. Étant donné la plage d'indices couverte, cette dernière a été divisée en quatre intervalles égaux en échelle logarithmique entre les valeurs extrêmes. Ce découpage permet de proposer des classes qui sont indépendantes de la répartition des valeurs observées pour les différentes substances constituant la base de données (quartiles des boîtes à moustaches). L'analyse conduit aux seuils présentés dans le *Tableau 1*. Pour chacune des quatre classes, un exemple de poudre est proposé. À noter que dans le cas d'une poudre qui serait classée dans deux catégories différentes selon l'indice considéré (en nombre ou en masse), il convient de considérer la classe de pulvéulence la plus élevée. Les seuils présentés dans ce tableau constituent une première proposition qui pourra évoluer si des données complémentaires sont intégrées à la base de données.

Essai inter-laboratoires

Afin de statuer sur la validité des classes proposées et de fournir des éléments en matière de variabilité inter-laboratoires, les indices de pulvéulence obtenus sur huit échantillons communs (trois dioxydes de silicium SiO_2 , quatre dioxydes de titane TiO_2 , et un échantillon de billes de verre) et couvrant toute la plage d'indices, ont été déterminés par l'INRS et le CEA. Les résultats sont présentés sur la *Figure 4*. Afin de montrer la diversité des morphologies de particules, des images de microscopie électronique des aérosols produits à partir de trois de ces poudres sont également proposées sur la *Figure 5*.

Les résultats présentés en *Figure 4* montrent que toutes les substances sont catégorisées dans les mêmes classes suivant les seuils proposés dans le *Tableau 1*, qu'il s'agisse des données produites par l'INRS ou par le CEA. Il est également constaté que, pour un échantillon de poudre donné, les valeurs absolues des indices de pulvéulence peuvent présenter des écarts. Ces derniers peuvent être dus à des différences sur :



↑ FIGURE 5 Exemples de clichés de microscopie électronique pour quelques matériaux provenant de la base commune INRS / CEA. A : billes de verre, B : dioxyde de titane, C : dioxyde de silicium.



© Louis Martin pour l'INRS / 2019

Expérimentation en laboratoire par la méthode de l'agitateur vortex.

- les bancs d'essais impliqués (longueurs et natures des tubes, présence de singularités de type coudes) ;
- les performances des appareils de mesure utilisés (typiquement : 5 % à 15 % entre deux compteurs de particules du même modèle) ;
- la nature des médias utilisés pour la collecte des aérosols, les conditions environnementales de la salle de pesée et les performances associées à l'analyse gravimétrique (répétabilité, limite de quantification).

Le fait que la classification soit équivalente entre les deux instituts pour chacune de ces huit poudres constitue un premier élément de validation de la reproductibilité de la méthode. À moyen terme, il pourrait être intéressant de disposer de matériaux de référence, idéalement pour chacune des classes proposées. Ceci permettrait aux laboratoires de réaliser un suivi des dispositifs impliqués dans la méthode d'essai (éléments du banc d'essais, appareils de métrologie des aérosols, équipements pour

l'analyse gravimétrique, etc.) et de fiabiliser les résultats des mesures de pulvérulence.

Perspectives

De nombreuses propriétés du matériau influencent la pulvérulence des poudres [11-15]. Il n'est pas possible de déterminer précisément leur indice de pulvérulence à partir de leurs seules propriétés physico-chimiques. Cependant, les données existantes montrent que ces derniers augmentent généralement lorsque la surface spécifique externe des poudres augmente, lorsque la masse volumique apparente de la poudre diminue, ou encore lorsque l'humidité relative de la poudre diminue.

Les relations entre la pulvérulence des poudres, l'émission d'aérosols en lien avec une activité, et les niveaux d'expositions professionnelles correspondants sont complexes [16-24]. Les données issues des essais de pulvérulence peuvent être utilisées comme des données d'entrée pour l'évaluation qualitative ou quantitative de l'exposition. Compte tenu de la diversité des opérations impliquant des poudres sur les lieux de travail, quatre méthodes complémentaires de mesurage de la pulvérulence existent. Chacune de ces méthodes est supposée représentative de scénarios réels d'utilisation. Les résultats de pulvérulence qui en sont issus peuvent ainsi varier, pour un matériau donné, en fonction de la méthode choisie. Au-delà de l'émissivité des poudres, l'exposition par inhalation est la résultante de nombreux autres facteurs : transport, pertes ou dépôt de particules dans l'atmosphère de travail en lien avec la ventilation des locaux, distribution granulométrique des particules... En première intention, dans des outils d'évaluation des risques chimiques par bandes de danger, la prise en compte de la classe de pulvérulence des poudres constitue un levier important de prévention. En effet, lorsque cela est possible, choisir des matériaux moins pulvérulents aux propriétés fonctionnelles équivalentes (substitution) permet de limiter les émissions de poussières lors de leurs manipulations, et par voie de conséquence, les niveaux d'exposition des opérateurs. Les indices de pulvérulence d'un matériau et la distribution granulométrique des aérosols émis peuvent également constituer une donnée d'entrée pour le dimensionnement et la mise en place de moyens de protection collective – tels que le captage à la source, le confinement, ou la ventilation – toujours en vue de réduire l'exposition des travailleurs. À moyen terme, poursuivre l'alimentation de la base de données des indices de pulvérulence obtenus par la méthode de l'agitateur vortex devrait permettre d'affiner les seuils proposés pour les quatre classes. Enfin, au-delà de la question du risque d'exposition par inhalation, la connaissance de la pulvérulence des poudres peut également présenter un intérêt en matière de prévention des risques d'explosion¹⁴ [25]. ●

1. Voir : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TS841page44> ; ou : <https://www.inrs.fr/demarche/document-unique/ce-qu-il-faut-retenir.html>
2. Voir : <https://www.seirich.fr/seirich-web/index.xhtml>
3. Voir : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/far-fas.html>
4. Voir : <https://protecpo.inrs.fr/ProtecPo/jsp/accueil.jsp>
5. Voir : <https://www.inrs.fr/publications/outils/mixie.html>
6. Voir : <https://sinlist.chemsec.org/>
7. Voir : Norme NF EN 17199-5 – Exposition sur les lieux de travail - Mesurage du pouvoir de resuspension des matériaux en vrac contenant ou émettant des nano-objets et leurs agrégats et agglomérats (NOAA) ou autres particules en fraction alvéolaire, Partie 5 : Méthode impliquant l'utilisation d'un agitateur vortex. *Afnor*, 2025.
8. Voir la fiche du guide méthodologique *MétroPol* « Prélèvement des aérosols par cyclones ». Accessible sur : <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cyclone/metropol-prelevement-cyclone.pdf>
9. Voir la fiche du guide méthodologique *MétroPol* « Analyse gravimétrique ». Accessible sur : <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-analyse-gravimetrique/metropol-analyse-gravimetrique.pdf>
10. Voir la fiche du guide méthodologique *MétroPol* « Mesure en temps réel de la concentration en nombre d'un aérosol submicronique au moyen d'un compteur de noyaux de condensation ». Accessible sur : <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-tempsreel-aerosolsubmicronique/metropol-tempsreel-aerosolsubmicronique.pdf>
11. Voir : Norme NF EN 15051-2+A1 – Exposition sur les lieux de travail. Mesurage du pouvoir de resuspension des matériaux pulvérulents en vrac. Partie 2 : Méthode du tambour rotatif. *Afnor*, 2017.
12. Voir : Norme NF EN 15051-3 – Exposition sur les lieux de travail. Mesurage du pouvoir de resuspension des matériaux pulvérulents en vrac. Partie 3 : Méthode de la chute continue. *Afnor*, 2025.
13. Voir : <https://www.r-nano.fr/>
14. Voir : VDI 2263, Part 9 – Dust fires and dust explosions. Hazards, assessment, protective measures. Determination of dustiness of bulk materials.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] INRS – Démarche d'évaluation des risques chimiques : méthode développée pour le logiciel *Seirich*. ED 6485, 2024. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206485>
- [2] LIDÉN G. – Dustiness testing of materials handled at workplaces. *The annals of occupational hygiene*, 2006, 50, pp. 437-439.
- [3] VINCENT R. ET AL. – Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique : un outil d'aide à la décision. *Hygiène & sécurité du travail*, 2005, ND 2233, pp. 39-62. Accessible sur : www.hst.fr
- [4] FRANSMAN W. ET AL. – Development of a mechanistic model for the advanced REACH tool (ART). TNO, 2010.
- [5] BAU S. ET AL. – Caractérisation des propriétés comportementales des poudres : l'écoulement et la pulvérisation. *Hygiène & sécurité du travail*, 2023, 272, pp. 29-36.
- [6] WITSCHGER O., DAZON C. – Pulvérisation de nanomatériaux : bilan et perspectives d'une décennie d'études et de recherche pour la prévention. *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, 256, pp. 41-47.
- [7] WITSCHGER O. 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 & sécurité du travail*, 2012, 226, pp. 41-55.
- [8] BAU S. ET AL. – La distribution granulométrique des aérosols au poste de travail : quels apports pour la santé et la sécurité au travail ? *Hygiène & sécurité du travail*, 2025, 279, pp. 5-10.
- [9] MATERA V., GAUDEL N., BAU S. – Intérêts et optimisation des prélèvements d'aérosols par impacteurs en cascade. *Hygiène & sécurité du travail*, 2022, 269, pp. 34-41.
- [10] BAU S. ET AL. – La distribution granulométrique des aérosols au poste de travail : quels moyens, quelles méthodes de mesure ? *Hygiène & sécurité du travail*, 2025, 279, pp. 70-77.
- [11] CHAKRAVARTY S. ET AL. – Towards a theoretical understanding of dustiness. *Granular matter*, 2019, 21, p. 97.
- [12] CHAKRAVARTY S. ET AL. – Dust generation in powders: effect of particle size distribution. *EPJ Web Conf.*, 2017, 140, 13018.
- [13] SHANDILYA N. ET AL. – Powder intrinsic properties as dustiness predictor for an efficient exposure assessment? *Annals of work exposures and health*, 2019, 63, pp. 1029-1045.
- [14] LEVIN M. ET AL. – Influence of relative humidity and physical load during storage on dustiness of inorganic nanomaterials: implications for testing and risk assessment. *Journal of nanoparticle research*, 2015, 17, pp. 1-13.
- [15] LÓPEZ LILAO A. ET AL. – Particle size distribution: A key factor in estimating powder dustiness. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2017, 14, pp. 975-985.
- [16] RIBALTA C. ET AL. – Use of the dustiness index in combination with the handling energy factor for exposure modelling of nanomaterials. *NanoImpact*, 2024, 33, 100493.
- [17] FONSECA A.S. ET AL. – Development of handling energy factors for use of dustiness data in exposure assessment modelling. *Annals of work exposures and health*, 2024, 68, pp. 295-311.
- [18] SCHNEIDER T., JENSEN K.A. – Relevance of aerosol dynamics and dustiness for personal exposure to manufactured nanoparticles. *Journal of nanoparticle research*, 2009, 11, pp. 1637-1650.
- [19] LEVIN M. ET AL. – Exposure assessment of four pharmaceutical powders based on dustiness and evaluation of damaged HEPA filters. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2014, 11, pp. 165-177.
- [20] RIBALTA C. ET AL. – On the relationship between exposure to particles and dustiness during handling of powders in industrial settings. *Annals of work exposures and health*, 2018, 63, pp. 107-123.
- [21] RIBALTA C. ET AL. – Health risk assessment from exposure to particles during packing in working environments. *Science of the total environment*, 2019, 671, pp. 474-487.
- [22] RIBALTA C. ET AL. – Testing the performance of one and two box models as tools for risk assessment of particle exposure during packing of inorganic fertilizer. *Science of the total environment*, 2019, 650, pp. 2423-2436.
- [23] RIBALTA C. ET AL. – Evaluation of one- and two-Box models as particle exposure prediction tools at industrial scale. *Toxics*, 2021, 9, p. 201.
- [24] BROUWER D.H. ET AL. – Size selective dustiness and exposure: simulated workplace comparisons. *The annals of occupational hygiene*, 2006, 50, pp. 445-452.
- [25] KLIPPEL A. ET AL. – Dustiness in workplace safety and explosion protection-review and outlook. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2015, 34, pp. 22-29.