

MISE EN SUSPENSION DE PARTICULES DE TUNGSTENE POLY-DISPERSEES PAR DES ECOULEMENTS D'AIR TURBULENTS : EFFETS DE LA CONCENTRATION SURFACIQUE ET DES COLLISIONS INTER-PARTICULES

Samuel Peillon¹, Ana M. Vidales², Jesica Benito², Rodolfo Uñac² et François Gensdarmes¹

¹Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSN-RES, SCA, Gif-sur-Yvette, 91192, France.

²INFAP, CONICET, Universidad Nacional de San Luis, San Luis, D5700HHW, Argentina.

*Courriel de l'orateur : samuel.peillon@irsn.fr

TITLE

Resuspension of poly-dispersed tungsten particles by turbulent air flows: effects of the surface concentration and inter-particle collisions.

RESUME

La mise en suspension de particules poly-dispersées par des écoulements d'air turbulents a été étudiée expérimentalement dans une soufflerie appelée BISE. La configuration a été soigneusement validée pour produire des écoulements d'air de référence pour différentes valeurs de vitesses de frottement. Des dépôts monocouches de particules de tungstène poly-dispersées sur des surfaces de tungstène ont été utilisés pour les expériences. La fraction de particules détachées par classe de taille de 1 μm à 50 μm a été quantifiée pour analyser les effets de la vitesse de frottement et de la concentration des particules sur la surface. La comparaison des résultats avec les modèles de mise en suspension a révélé des divergences pour le comportement des particules de diamètre inférieur à 4,5 μm . Ces divergences n'ont pas pu être comprises par l'évaluation de la distribution des forces d'adhésion particule-surface réalisée par microscopie à force atomique. En revanche, pour des concentrations surfaciques de particules allant de 47 à 85 mm^{-2} , un effet de collision a été identifié en raison de la concentration et de la poly-dispersion des particules déposées sur la surface. En effet, lors de l'analyse des données expérimentales, une bonne corrélation linéaire est obtenue entre la fraction de petites particules détachées et un paramètre de collision, démontrant que les collisions pourraient être responsables de la fraction de mise en suspension étonnamment élevée pour une taille de particule inférieure à 4,5 μm de diamètre. Les données expérimentales et l'analyse présentée dans l'article montrent que la concentration surfacique des particules et les effets de collision sont clairement pertinents et doivent être pris en compte dans les modèles de mise en suspension, en particulier dans le cas de dépôts de particules poly-dispersées.

ABSTRACT

Poly-dispersed particle resuspension by turbulent airflow was experimentally studied in a wind tunnel called BISE. The set-up was carefully validated to produce reference airflows with different friction velocities values. Monolayer deposits of poly-dispersed tungsten particles on tungsten surfaces were used for the experiments. The fraction of detached particles by size bin from 1 μm to 50 μm was quantified to analyze the effects of friction velocity and particles concentration on surface. Comparison of the results with resuspension modeling revealed discrepancies for particles behavior with diameter below 4.5 μm . These discrepancies could not be understood by assessment of particle-surface adhesion force distributions carried out with Atomic Force Microscopy analysis. For particle surface concentrations ranging from 47 to 85 mm^{-2} , a collision effect was identified due to the concentration and poly-dispersion of particles deposited on the surface. Indeed, when analyzing the experimental data, a good linear correlation is obtained between the fraction of the small particles detached and a collision parameter, demonstrating that collisions could be responsible for the unexpectedly high resuspended fraction observed for particle size below 4.5 μm in diameter. The experimental data and the analysis presented in the paper show that particle surface concentration and collision effects are clearly relevant and should be considered in resuspension models, especially for poly-dispersed particles assessment.

MOTS-CLÉS : Mise en suspension, adhésion, particule, collision / **KEYWORDS**: Resuspension, adhesion, particle, collision

1. INTRODUCTION

Les installations de fusion nucléaire basées sur le confinement magnétique du plasma par technologie tokamak produisent des poussières métalliques (béryllium et tungstène) toxiques et/ou radioactives du fait des interactions plasmas/parois au sein de la chambre à vide (Sharpe *et al.*, 2002). En plus d'être un facteur de pollution du plasma, ces poussières posent également des problèmes d'exposition des travailleurs et de sûreté en cas d'ouverture de la machine aussi bien pour des raisons de maintenance qu'en situation accidentelle. Il apparaît ainsi nécessaire de connaître les propriétés d'adhésion et de mise en suspension de ces poussières au cours de la vie de ces réacteurs. Pour cela, l'IRSN conduit depuis plusieurs années des recherches de manière à améliorer les connaissances tant sur le terme source que sur la mise en suspension de ces contaminants (Peillon *et al.*, 2014, 2019 ; Gélain *et al.*, 2015, 2020 ; Rondeau *et al.*, 2021). Afin d'améliorer les prévisions données par les codes de calcul sur la mise en suspension de contaminants particuliers, nous proposons dans ce travail d'étudier la mise en suspension par des écoulements d'air turbulents de particules de tungstène poly-dispersées déposées sur une surface en tungstène. Parmi les nombreux paramètres ayant

une influence sur la mise en suspension des poussières, nous pouvons citer : les propriétés physico-chimiques des poussières (nature, taille et forme des particules), du substrat (nature et rugosité), les caractéristiques de l'écoulement d'air (vitesse de frottement et intensité de turbulence) et les propriétés du dépôt de particules (mono ou multicouche et concentration surfacique).

Nous montrerons que l'ensemble de ces paramètres peuvent être déterminés à l'aide de plusieurs techniques de mesure, permettant ainsi d'étudier leur influence respective tout en limitant l'ajustement des modèles de mise en suspension avec des valeurs arbitraires. Nous détaillerons ensuite les résultats des expériences et montrerons que la prise en compte de phénomènes de collision entre les particules, dépendant notamment de la concentration surfacique, permet d'expliquer la mise en suspension importante des particules de petites tailles présentes dans les dépôts.

2. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Les expériences ont été effectuées dans la soufflerie BISE-II de l'IRSN située à Saclay. Les caractéristiques de l'écoulement d'air (profils de vitesse et intensité de turbulence) produit dans cette soufflerie ont été déterminées à l'aide d'une chaîne anémométrie à fil chaud à haute fréquence (Dantec Dynamics).

Les poudres utilisées sont composées de particules de tungstène pur (A.M.L.T. Corp.) et leur distribution granulométrique a été mesurée par microscopie optique (*Morphologi G3* Malvern). Les particules sont largement poly-dispersées entre 1 μm et 50 μm avec un diamètre médian autour de 8 μm . Lors des expériences, les particules sont déposées sur une surface rugueuse de tungstène de 4 x 4 cm^2 à l'aide d'un dispositif permettant de disperser de manière contrôlée les particules. La concentration surfacique du dépôt est alors ajustée en fonction du volume de poudre utilisé pour faire le dépôt. Un exemple de dépôt est présenté sur la Figure 1. Nous présentons également sur cette figure des micrographies MEB montrant la forme des particules de tungstène utilisées. Nous constatons que ces particules ont une forme de polyèdre irrégulier et qu'elles peuvent être déposées sous forme d'agrégats. Nous avons ensuite caractérisé la rugosité du substrat en tungstène en effectuant une mesure de sa topographie par AFM (Scanasyst mode, Bruker Multimode 8) sur trois zones de 50 x 50 μm^2 . Un exemple d'une topographie est présenté sur la Figure 1 avec un profil de hauteur (ligne blanche sur la figure). La rugosité moyenne obtenue ($R_a \approx 250 \text{ nm}$) est significative et va entraîner une forte réduction de l'adhésion (ainsi qu'un étalement de la distribution des forces) entre les particules et la surface, par rapport au cas théorique d'une particule sphérique sur une surface lisse.

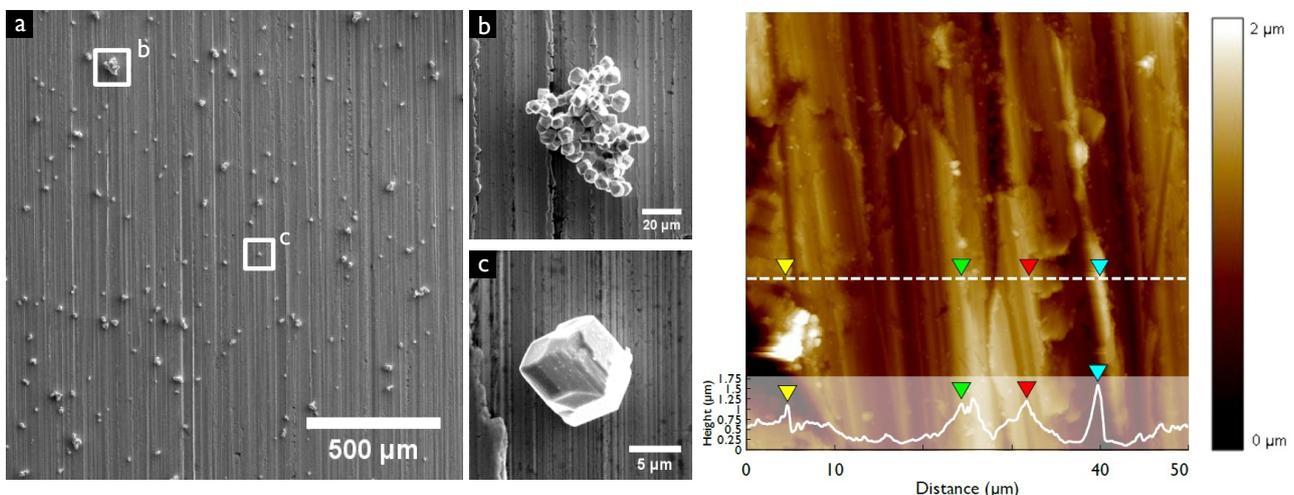


Figure 1 – Micrographie MEB montrant le dépôt de particules de tungstène sur la surface en tungstène (a) et zoom sur un agrégat (b) et une particule unique (c). Topographie AFM d'une zone de 50 x 50 μm^2 montrant la rugosité de la surface de tungstène (image de droite).

Pour compléter la caractérisation des systèmes particules/substrat étudiés, nous avons mesuré les distributions de forces d'adhésion pour différentes tailles de particules sur le substrat en tungstène. Ces mesures ont été effectuées par AFM en mode PF-QNM (*PeakForce Quantitative Nanoscale Mechanical mode*) selon la méthode déjà présentée dans Peillon *et al.* (2019). Afin de pouvoir utiliser ces données dans les modèles de mise en suspension, des corrélations entre la force d'adhésion moyenne et l'écart-type géométrique d'une part, et la taille des particules d'autre part, sont proposées.

3. ANALYSE DES RESULTATS

Trois expériences de mise en suspension ont été répétées pour une vitesse de frottement, u^* , de 1,5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ à la pression atmosphérique. Tous les essais ont été réalisés avec une durée d'écoulement d'air de 10 min sur les dépôts. Seule la concentration surfacique des dépôts de particules a été modifiée au cours de ces trois

tests, celle-ci étant de 47 mm², 63 mm² et 85 mm², respectivement. Les fractions moyennes de mise en suspension (K_r) obtenues en fonction de la taille des particules sont présentées sur la Figure 2. Nous constatons des valeurs de K_r élevées ainsi qu'un plateau sur la gamme des fines particules ($1 \mu\text{m} < D_p < 5 \mu\text{m}$). Ce résultat est contre intuitif car la fraction mise en suspension devrait décroître lorsque la taille des particules diminue. De même, une dispersion plus importante des données est observable sur cette gamme de taille. Ces résultats sont comparés au modèle Rock'n Roll (RnR) de Reeks et Hall (2001) en utilisant les corrélations issues des mesures AFM établies précédemment ou avec la corrélation, plus générique, proposée par Biasi *et al.* (2001). Il ressort clairement que la prédiction du modèle RnR utilisant les données AFM n'est pas cohérente avec les données expérimentales, et ce, quelle que soit la taille des particules. En revanche, les calculs effectués avec le modèle RnR en utilisant la corrélation de Biasi *et al.* sont plus précis notamment pour les plus grosses particules ($D_p > 10 \mu\text{m}$). Cependant, la tendance renvoyée par le modèle montre une nette sous-estimation des fractions mises en suspension pour les fines particules ($D_p < 5 \mu\text{m}$).

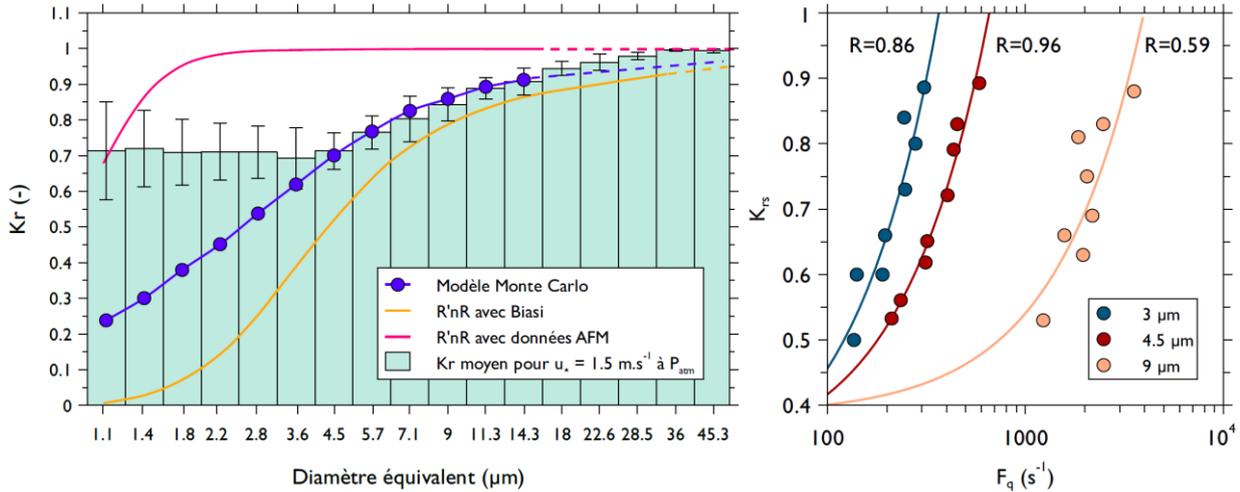


Figure 2 – Fractions moyennes mises en suspension en fonction de la taille des particules (à gauche) et comparaison avec les différents modèles. Corrélations entre la fraction mise en suspension et la fréquence de collision pour trois diamètres de coupure (3 μm , 4,5 μm et 9 μm) de la distribution initiale (à droite).

Ces résultats expérimentaux ont également été comparés à un autre modèle de mise en suspension basé sur une méthode de calcul Monte Carlo (MC) introduite par Benito *et al.*, (2016) et qui utilise les forces d'adhésion trouvées expérimentalement par AFM. On constate que ce modèle présente un meilleur accord avec les données bien que le plateau observé pour les fines particules ne puisse pas être expliqué avec cette approche. Sur la base de ces résultats expérimentaux, et compte tenu de la limitation des modèles sélectionnés pour expliquer le taux élevé de mise en suspension des fines particules, l'hypothèse de collisions entre les particules mérite d'être abordée.

Pour ce faire, différentes étapes doivent être définies afin de présenter l'analyse. Premièrement, on propose de séparer la population de particules en deux groupes, comprenant respectivement les grosses particules et les fines particules. On calcule ensuite, pour chaque groupe, la fraction mise en suspension et les concentrations surfaciques respectives. On introduit une fréquence de collision, F_q , entre les particules de chaque groupe par :

$$F_q = \frac{u^* C_{small}}{\lambda_m C_{big}}$$

où u^* représente la vitesse de frottement, $\lambda_m = \frac{1}{D_{big} C_{small}}$ la distance moyenne parcourue par une grosse particule de diamètre D_{big} pour rencontrer une petite particule, C_{small} la concentration surfacique des petites particules et C_{big} la concentration surfacique des grosses particules.

Si des collisions sont présentes et viennent favoriser la mise en suspension du groupe des petites particules, le paramètre F_q , devrait en rendre compte. On représente alors sur la Figure 2 la fraction mise en suspension du groupe des petites particules, $K_{r,s}$, en fonction de F_q pour trois diamètres de coupure différents (3 μm , 4,5 μm et 9 μm). On constate que la meilleure corrélation entre la fréquence de collision et la fraction mise en suspension est obtenue pour 4,5 μm , ce qui est par ailleurs cohérent avec la gamme de taille où les prédictions des modèles s'éloignent des résultats expérimentaux. Une description plus approfondie de l'analyse effectuée sur la fréquence de collision sera proposée au cours de la présentation de ces travaux.

4. CONCLUSIONS

Au cours de ce travail, un effort expérimental important a été fait pour caractériser les nombreux paramètres physiques qui entrent en jeu dans les mécanismes de mise en suspension des particules. Ces données nous ont notamment permis d'utiliser des modèles analytiques sans faire d'hypothèses sur leurs paramètres d'entrée. Les expériences ensuite réalisées avec des particules de tungstène poly-dispersées ont présenté des fractions de mise en suspension élevées et inattendues pour les particules de diamètre inférieur à $4,5 \mu\text{m}$. Ce résultat n'a pas pu être expliqué en utilisant des approches théoriques classiques, qui sous-estiment systématiquement la fraction mise en suspension pour cette gamme de taille. Néanmoins, les résultats des modèles sont cohérents avec les résultats expérimentaux pour les particules plus grosses ($D_p > 5 \mu\text{m}$), l'approche MC étant légèrement meilleure par rapport au modèle RnR.

Pour expliquer ces résultats, nous avons analysé l'hypothèse de collisions entre les particules en proposant le mécanisme suivant : les grosses particules sont entraînées par l'écoulement d'air en roulant sur la surface avant d'être détachées et entraînées en dehors de la couche limite. Lors de la phase de roulement, ces particules peuvent entrer en collision avec une particule plus petite, provoquant sa mise en suspension. Selon la configuration initiale du dépôt, une forte concentration relative en petites particules favorise un taux de mise en suspension élevé et, à l'inverse, une forte concentration relative en grosses particules réduit la probabilité qu'une grosse particule heurte une petite particule. C'est une particularité clairement absente dans les systèmes mono-dispersés ou quasi mono-dispersés.

Il est important de noter que la dynamique de mise en suspension des particules poly-dispersées peut être très complexe, rendant l'utilisation d'hypothèses nécessaires en l'absence d'informations plus détaillées. Par exemple, les amas de petites particules à la surface ont été considérés comme des particules uniques de grande taille. Ces agrégats pourraient également jouer un rôle important dans le mécanisme de collision en raison de la probabilité plus élevée de fragmentation de ces clusters. Nous n'avons pas été en mesure d'aborder cette hypothèse dans nos expériences et un enregistrement direct de la dynamique de mise en suspension des particules poly-dispersées est envisagé pour les travaux futurs.

Benito J., Uñac R., Vidales A., Ippolito I. (2016). Validation of the Monte Carlo model for resuspension phenomena. *Journal of Aerosol Science*, 100, 26-37.

Biasi, L., de los Reyes, A., Reeks, M.W. & de Santi, G.F. (2001). Use of a simple model for the interpretation of experimental data on particle resuspension in turbulent flows. *Journal of Aerosol Science*, 32, 1175-1200.

Gelain, T., Rondeau, A., Peillon, S., Sabroux, J.C. & Gensdarmes F. (2015). CFD modelling of the wall friction velocity field in the ITER tokamak resulting from airflow during a loss of vacuum accident — Consequences for particle resuspension. *Fusion Engineering and Design*, 100, 87-89.

Gelain, T., Gensdarmes F., Peillon, S., and Ricciardi L. (2020). CFD modelling of particle resuspension in a toroidal geometry resulting from airflows during a loss of vacuum accident (LOVA). *Fusion Engineering and Design*, 151, 111386.

Peillon, S., Roynette, A., Grisolia, C. & Gensdarmes, F. (2014). Resuspension of carbon dust collected in Tore Supra and exposed to turbulent airflow: Controlled experiments and comparison with model. *Fusion Engineering and Design*, 89/11, 2789-2796.

Peillon S., Autricque A., Redolfi M., Stancu C., Gensdarmes F., Grisolia C. & Pluchery O. (2019). Adhesion of tungsten particles on rough tungsten surfaces using atomic force microscopy, *Journal of Aerosol Science*, 137, 105431.

Reeks, M.W. & Hall, D. (2001). Kinetic models for particle resuspension in turbulent flows: theory and measurement. *Journal of Aerosol Science*, 32, 1-31.

Rondeau A., Peillon S., Vidales A. M., Benito J., Uñac R., Sabroux J.-C. and Gensdarmes F. (2021) Evidence of inter-particle collision effect in airflow resuspension of poly-dispersed non-spherical tungsten particles in monolayer deposits. *Journal of Aerosol Science*, 154, 105735.

Sharpe J.P., Petti D.A. and Bartels H.-W. (2002). A review of dust in fusion devices: Implications for safety and operational performance. *Fusion Engineering and Design*, 63-64, 153-163.