

CHARGE DES PARTICULES D'AÉROSOL LORS DE COLLISIONS ENTRE PARTICULES ET PAROIS

A. Plack¹, S. Zhang¹, A. Wollmann¹ et A.P. Weber*¹

¹Institut de Technologie des Particules, Université Technique de Clausthal, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Allemagne

*Courriel de l'orateur : alfred.weber@mvt.tu-clausthal.de

TITLE

Charging of aerosol particles in particle-wall collisions

RESUME

La charge des particules d'aérosol joue un rôle important dans de nombreuses applications telles que la photocopie et l'amélioration de la séparation des particules dans les filtres électrostatiques. Il a récemment été démontré que la charge dépendante du matériau peut également être utilisée pour trier des particules dans des processus de recyclage à sec (Javadi et al., 2025). La collision de particules avec des parois auxquelles un potentiel est appliqué peut même être utilisée pour régler la charge des particules de négative à neutre à positive. Ce processus, appelé « chargement triboélectrique forcé », est à la base des recherches présentées ici.

ABSTRACT

The charge of aerosol particles plays an important role in many applications such as photocopying and improving particle separation in electrostatic filters. It has recently been demonstrated that material-dependent charge can also be used to sort particles in dry recycling processes (Javadi et al., 2025). The collision of particles with walls to which a potential is applied can even be used to adjust the charge of particles from negative to neutral to positive. This process, called "forced triboelectric charging," is the basis for the research presented here.

MOTS-CLÉS : chargement triboélectrique forcé, recyclage de poudre à sec, nanoparticules / **KEYWORDS**: forced triboelectric charging, dry powder recycling, nanoparticules

1. CONFIGURATION EXPÉRIMENTALE

Dans ce qui suit, nous aborderons tout d'abord la fabrication des particules, leur collision définie avec une paroi (vitesse d'impact) ainsi que la caractérisation du travail de sortie des particules et de la paroi, qui déterminent le transfert de charge.

Le chapitre suivant présente ensuite le modèle de condensateur utilisé et l'influence d'une tension électrique appliquée à la cible sur la charge des particules.

1.1. Synthèse et modification des particules

Pour produire des particules aux propriétés définies, on a utilisé un générateur à décharge électrique dans lequel la composition du gaz était contrôlée avec précision. Bien qu'il soit possible de mieux contrôler la teneur en oxygène (Olszok et al., 2023), on a travaillé ici avec un gaz vecteur N₂ (5,0). L'ajout de ces faibles quantités d'oxygène (quelques ppm) a permis de générer des particules avec une fine couche d'oxyde à la surface. Afin d'ajuster la morphologie des particules, un four tubulaire a été utilisé immédiatement après le générateur d'étincelles, dans lequel les particules ont été partiellement ou totalement frittées.

1.2. Impaction à basse pression

Après sélection de la taille dans un analyseur de mobilité différentielle (AMD), les particules ont été introduites dans un impacteur à basse pression (composé d'une buse d'accélération et d'une plaque d'impact, voir fig. 1, à gauche) via une buse critique. La vitesse d'impact v_{imp} a été modifiée via la pression absolue p dans l'impacteur à basse pression et déterminée selon la formule de Rennecke et Weber (2013) :

$$v_{imp} = v_{max}(p, m_g) * v_{non-dim}(StK, L/D) * \chi_{lag}(StK, L/D, H/D) \quad (1)$$

où m_g est le débit massique du gaz, StK est le nombre de Stokes, L est la distance entre la buse d'accélération et la plaque d'impact, D est le diamètre de la buse et L est la longueur de la buse (voir Fig. 1, à gauche). Le nombre de Stokes se calcule comme suit : $StK = \tau * v_{max} / (D/2)$ où τ est le temps de relaxation des particules. La fonction $v_{non-dim}$ tient compte de l'auto-similarité des écoulements laminaires dans les buses et la fonction χ_{lag}

prend en considération les effets d'inertie des particules par rapport à l'écoulement. On trouve plus de détails dans Rennecke et Weber (2013).

Après avoir rebondi sur la cible d'impact, la charge des particules a été mesurée à l'aide d'un électromètre à coupe de Faraday (FCE). De plus, une haute tension a pu être appliquée à la plaque d'impact.

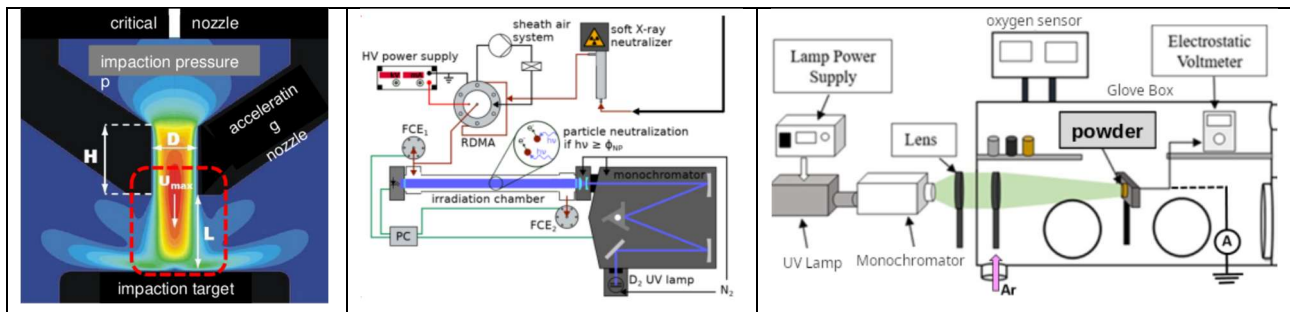


Figure 1. Parties du dispositif expérimental : (à gauche) représentation schématique de l'impacteur basse pression ; (au centre) installation de spectroscopie de photoémission d'aérosols ; (à droite) installation de spectroscopie de courant photoélectronique de poudre et de plaque métallique.

1.3. Caractérisation des particules

Outre les méthodes standard utilisées pour caractériser la taille des particules (Scanning Mobility Particle Sizer : SMPS) et leur morphologie (TEM & SEM), des techniques développées en interne ont été utilisées pour mesurer in situ le travail photoélectrique de sortie des particules d'aérosol (Aerosol Photoemission Spectroscopy: APES (Olszok et al., 2023)) et déterminer le travail photoélectrique de sortie de la plaque d'impact (Powder Photoelectron Current Spectroscopy : PPCS (Zhang and Weber, 2025)) (voir Fig. 1). De plus, la densité effective des particules dans l'impacteur à basse pression a été mesurée à l'aide de courbes de dépôt avec une plaque d'impact graissée. La densité est un paramètre sensible pour les couches d'oxyde à la surface des particules (Seipenbusch et al., 2002), qui sont également détectables par photoémission.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tout d'abord, un modèle de transfert de charge est présenté, et ses prédictions sont comparées aux résultats expérimentaux. En particulier, l'influence de la vitesse d'impact et de la taille des particules sur le transfert de charge entre la particule et la paroi (plaque d'impact) est présentée. On montre ensuite que la charge des particules après rebond peut être ajustée arbitrairement par la tension appliquée.

2.1. Modèle de transfert de charge

Le modèle dit « condensateur » a été utilisé pour enregistrer le transfert de charge. On part ici du principe que la surface de contact entre la particule et la surface d'impact (paroi) forme une capacité et que la charge transférée est déterminée par la différence de potentiel entre les deux surfaces. Outre les travaux de sortie des deux surfaces, un potentiel externe appliqué (V_{ex}) peut également influencer la différence de potentiel ΔV (Mirkowska et al., 2016):

$$\Delta q = k_c * C * \Delta V = k_c * (\epsilon_0 * S / z_0) * ((\phi_p - \phi_w) / e + (V_{ex} / L) * d_p) \quad (2)$$

où k_c représente l'efficacité de charge et C est la capacité du système de contact. ϕ_p et ϕ_c désignent respectivement le travail photoélectrique de sortie de la particule et de la paroi (plaque d'impact). z_0 est l'écart critique entre les corps de contact, tandis que ϵ_0 est la permittivité absolue du gaz. S représente la zone de contact entre la particule et la paroi et le terme $(V_{ex}/L) * d_p$ représente la force du champ électrique externe ($E = V_{ex}/L$) sur la plage de taille des particules (de diamètre d_p). Le champ peut être défini en rapportant la tension appliquée V_{ex} à une longueur caractéristique (L), c'est-à-dire la distance au potentiel de terre suivant. La preuve expérimentale de l'applicabilité de l'équation (1) a été apportée avec des Au-NP de différentes tailles en faisant varier la vitesse d'impact, sans appliquer de potentiel externe ($V_{ex}=0$). Les résultats sont montrés dans la figure 2 (à gauche). On constate qu'après le début du rebond (zone A), toutes les particules rebondissent dans la zone B et qu'une charge d'équilibre est atteinte. Dans la zone B, la charge d'équilibre est en bonne corrélation avec la taille des particules. En plus, la vitesse de la transition entre déformation élastique (zone B) et plastique (zone C) augmente inversement avec la taille des particules. Dans la zone de déformation plastique, aussi la pente varie en fonction de la taille des particules.

Tableau 1. Aperçu des matériaux utilisés et de leurs travaux de sortie et de leurs pressions de rendement

Particules	Travail de sortie (APES) / eV	Pression de rendement /MPa (hard-drawn)	Cible	Travail de sortie (PPCS) / eV	Pression de rendement /MPa (hard-drawn)
Au	4.46	250	Pt	4.82	370
Cu	4.93	320	Au	4.46	250

La charge efficace des nanoparticules d'aérosol représente un défi majeur. En raison de l'accumulation diffusive d'ions gazeux, seule une petite fraction des particules est chargée (quelques pourcents en dessous de 10 nm), tant pour les environnements ioniques bipolaires que unipolaires (Kruis et Fissan, 2001). Une augmentation de la proportion de particules chargées plusieurs fois peut être obtenue par photoémission. Mais même dans ce cas, seule une fraction (généralement moins de 20 % des particules) est chargée (Jung et al., 1988 ; Hontanon and Kruis, 2008). Même comparée aux meilleurs chargeurs, la méthode d'impact présentée ici permet d'obtenir des charges beaucoup plus élevées pour toutes les particules, comme le montre la figure 2 (à gauche). En appliquant une tension électrique externe à la cible d'impact, cette charge peut également être modifiée et éventuellement augmentée, comme le montre le chapitre suivant.

2.2. Réglage de la charge des particules

Dans l'étape suivante, la haute tension appliquée à la plaque d'impact a été modifiée. Il a été constaté que cela permettait d'ajuster la charge des particules rebondissantes, de négative à neutre puis à positive. Ce phénomène est illustré sur la figure 2 (à droite) pour des particules de cuivre de 30 nm à différentes vitesses d'impact.

Bien que les particules chargées aient des applications variées, le passage par zéro, que nous appelons « Point de charge nette nulle » (PCN), présente un intérêt particulier pour la caractérisation de la surface des particules. En effet, d'après l'équation (2), cette valeur de PCN est censée compenser la différence entre les fonctions de travail de la particule et du matériau de la paroi. Puisque la fonction de travail de la paroi reste constante, le PCN est directement lié à la fonction de travail de la particule. La relation illustrée sur la figure 2 (à droite) peut être obtenue en comparant les valeurs de PCN aux fonctions de travail mesurées par APES.

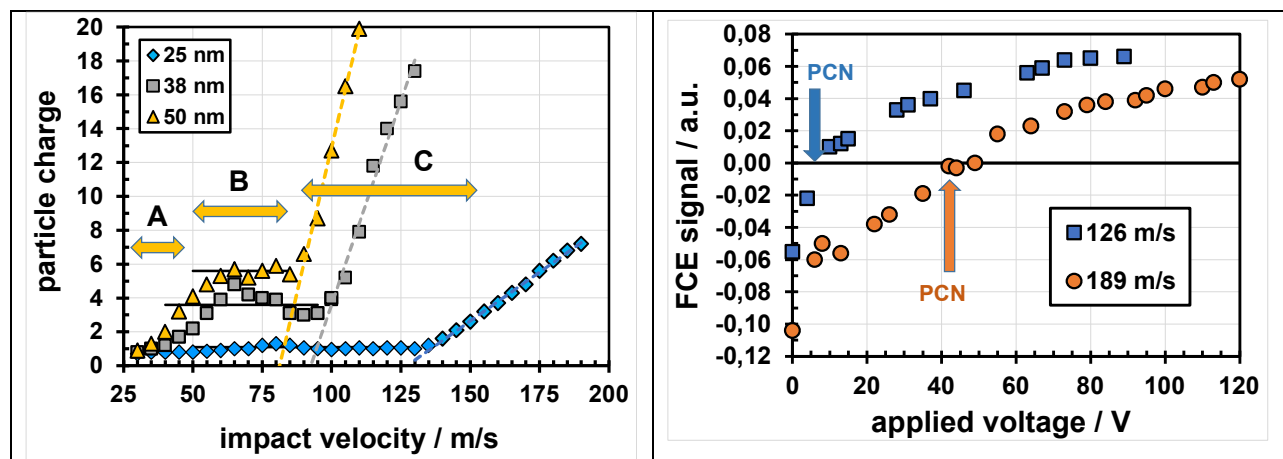


Figure 2. (à gauche) Charge particulaire pour trois classes de taille en fonction de la vitesse d'impact (Au NP sur Pt cible) sans tension électrique appliquée. Pour les particules de 50 nm, les trois zones A, B et C sont indiquées : A = début de détachement, B = charge d'équilibre en cas d'absorption complète (zone élastique), C = déformation plastique; (à droite) Influence de la tension électrique appliquée sur la charge des particules projetées à deux vitesses d'impact (30 nm Cu NP sur Au cible; Le signal FCE est proportionnel à la charge ; PCN : Point de charge nette nulle).

Comme on peut le constater de la figure 2 (à gauche), le travail d'extraction diminue avec l'augmentation de la vitesse d'impact dans le domaine de la déformation plastique (zone C). Il a été démontré que le travail d'extraction diminue également avec l'augmentation de la densité de défauts de surface. Par conséquent, il est raisonnable de corrélérer la tendance observée avec la formation de défauts, dont le nombre augmente avec la vitesse d'impact. Lors d'un choc particule-paroi dans la zone de déformation plastique (zone C), le matériau

présentant la pression d'écoulement la plus faible se déforme en premier. Dans le cas des NP d'or sur une cible de Pt, ce sont les NP, tandis que dans le cas des NP de Cu sur une cible d'Au, c'est d'abord la plaque d'or qui se déforme. Dans les deux cas, il en résulte donc une augmentation de la différence de potentiel, ce qui se traduit par une augmentation du transfert de charge (voir fig. 2).

Ainsi, pour la première fois, une méthode permettant de caractériser les surfaces des particules sous des contraintes ultra-courtes (de l'ordre de la picoseconde) a été mise au point.

Références et remerciements

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à la Fondation Allemande pour la Recherche (DFG) pour son soutien financier à ce projet. Nous remercions également M. Vincent Olszok pour ses précieux échanges et Mme Peggy Knospe pour les images au microscope électronique à transmission et de nombreuses préparations des cibles d'impact par pulvérisation cathodique.

Hontanon, E., Kruis; F.E. (2008) *Aerosol Sci. Technol.* 42, 310-323

Javadi, M., Abohelwa, M., Wollmann, A., Weber, A.P. (2025) *Powder Technol.* 449, 120400

Jung, Th., Burtscher, H., Schmidt-Ott, A. (1988) *J. Aerosol Sci.* 19, 485-490

Kruis, F.E., Fissan, H. (2001) *J. Nanoparticle Res.* 3, 39-50

Mirkowska, M., Kratzer, M., Teichert, Ch., Flachberger, H. (2016) *BHM* 161, 359-382

Olszok, V., Bierwirth, M., Weber, A.P. (2023) *ACS Appl. Nano Mater.* 6, 1660-1666

Olszok, V., Rembe, P., Weber, A.P. (2023) *Aerosol Sci. Technol.*, doi.org/10.1080/02786826.2023.2285307

Seipenbusch, M., Heel, A., Weber, A.P., Kasper, G. (2002) *Chem. Eng. Technol.* 25, 77-8

Zhang, S., Weber, A.P. (2025) *Rev. Sci. Instrum.* 96, 035110, doi: 10.1063/5.0243840