

TITLE

Evaluation of Electrostatic Interactions Influence on Saltation Modeling

TITRE

Evaluation de la Contribution des Interactions Electrostatiques à la Modélisation de la Saltation

¹Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection (ASNR), PSN-RES/SCA/LPMA, 91400 Saclay, France

²Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA), 94000 Créteil, France

J. Delean^{1,2}, M. Sow^{*1} et B. Marticorena²

*Courriel de l'orateur : mamadou.sow@asn.fr – Communication orale

RESUME

Des champs électriques intenses (jusqu'à 166 kV/m) (Schmidt, 1998) se forment lors d'épisodes d'érosion éolienne, dus à la triboélectrification : les particules fines tendent à se charger négativement et les plus grosses tendent à se charger positivement, selon la composition et l'historique de collisions, générant un champ électrique vertical influençant la saltation et le seuil de mise en mouvement des particules. L'intégration d'un module électrostatique au schéma de saltation de Marticorena et Bergametti (1995) montre qu'il réduit la vitesse de vent nécessaire à l'érosion et amplifie le flux de saltation près du seuil. Pour les particules isolantes comme le sable quartzeux, le flux est maximal pour des grains neutres ; il augmente si les grains sont positifs et diminue s'ils sont négatifs.

ABSTRACT

Intense electric fields (up to 166 kV/m) (Schmidt, 1998) form during episodes of wind erosion due to triboelectricity: fine particles tend to become negatively charged and larger particles tend to become positively charged, depending on their composition and collision history, generating a vertical electric field that influences saltation and the threshold for particle movement. Adding an electrostatic module to the Marticorena and Bergametti (1995) saltation scheme shows that it reduces the wind speed required for erosion and increases the saltation flux near the threshold. For insulating particles such as quartz sand, the flux is maximum for neutral grains; it increases if the grains are positive and decreases if they are negative.

MOTS-CLES / KEYWORDS: Seuil de mise en mouvement, Champs électriques, Saltation, Erosion éolienne / Movement threshold, Electric fields, Saltation, Aeolian erosion.

THEME : Métrologie des aérosols.

1. CONTEXTE

L'érosion éolienne façonne les cycles biogéochimiques, la qualité de l'air et le climat en modulant l'émission, le transport et le dépôt des poussières atmosphériques. Les champs électriques générés par la triboélectrification modifient ces processus, en particulier près du seuil d'émission. En contexte post-accidentel nucléaire, ces phénomènes sont déterminants : les radionucléides peuvent s'adsorber et/ou s'agréger aux particules en suspension ou à la surface du sol, être remobilisés et transportés sur de longues distances, ce qui soulève des enjeux environnementaux et sanitaires majeurs. Bien que ces processus puissent se manifester sur tout type de sol, ils sont particulièrement visibles et marqués dans les environnements désertiques.

2. GÉNÉRALITÉS - PROCESSUS ÉLECTRIQUES LORS DE L'ÉROSION ÉOLIENNE

2.1. Érosion éolienne

Ce travail ambitionne d'améliorer les capacités de simulation de la dispersion des radionucléides dans l'environnement en étudiant la remise en suspension des poussières minérales potentiellement porteuses de radionucléides. Ces particules sont mobilisées dans l'atmosphère par le vent, dans un processus appelé saltation. Ce phénomène se produit lorsque la vitesse de friction dépasse une valeur seuil. La vitesse de friction est définie comme :

	$u_* = (\tau_0/\rho)^{1/2},$	Équation 1
--	------------------------------	------------

Avec τ_0 , la force de cisaillement sur la surface et ρ la densité du fluide. Les grains qui entrent en saltation suivent une trajectoire balistique puis retombent sur la surface. S'ils possèdent assez d'énergie cinétique, ils la transfèrent aux grains restés à la surface qui rebondissent alors par impact. Les plus petites particules ne sont pas directement arrachées par le vent puisque leurs forces de cohésion interparticulaires sont trop fortes, mais sont mises en mouvement par l'impact de grains plus gros, qui peuvent fragmenter les agrégats. La distribution granulométrique de ces particules émises reste peu connue. Un objectif de ce travail est également de clarifier pourquoi certaines études suggèrent une distribution en taille quasi universelle des aérosols émis

lors de l'érosion éolienne, indépendamment des régions (Kok, 2011), tandis que d'autres études concluent à une dépendance vis-à-vis de l'intensité du vent (Huang et al., 2025).

2.2. Génération de champs électriques

Le processus d'électrification des particules, encore mal compris (Kok & Renno, 2008), résulte probablement des transferts de charge lors des collisions entre grains de taille ou composition différentes. La charge acquise dépend de la taille des particules : en général, les particules plus fines acquièrent une charge nette négative, tandis que les grosses portent une charge nette positive avec un diamètre critique d'inversion de polarité autour de 250 μm (Inculet et al., 2006), (Lacks & Levandovsky, 2007). Sous l'effet du vent, les particules plus fines et plus légères sont transportées à des altitudes plus élevées tandis que les plus grosses restent proches de la surface. Des champs électriques peuvent ainsi se former en présence de vents forts dans des milieux granulaires, tels que les tempêtes de sable et de poussières ou encore les tempêtes de neige (Renno & Kok, 2008). Selon la nature diélectrique du sol, ils peuvent soit faciliter le soulèvement des particules en réduisant la vitesse de friction seuil (Kok & Renno, 2006), soit, au contraire, entraver leur soulèvement en augmentant la vitesse de friction seuil (Zhang, 2024).

3. MODÈLE ET INTÉGRATION DES FORCES ÉLECTROSTATIQUES DANS LE CALCUL DU FLUX DE SALTATION

Le modèle, initialement développé par Marticorena & Bergametti, (1995), calcule le flux de saltation et d'émission de poussières minérales en tenant compte de la granulométrie du sol, des éléments non érodables présents sur la surface et qui extraient une partie de l'énergie cinétique du fluide, et de la vitesse de friction qui détermine la contrainte de cisaillement appliquée à la surface. La vitesse de friction seuil est d'abord estimée à partir de la formulation de Kok & Renno, (2006) pour un sol et des particules conducteurs, puis à partir de la formulation de (Zhang, 2024) pour un sol et des particules isolants.

3.1. Variation du flux de saltation en fonction du champ électrique pour un sol conducteur et des particules conductrices

Avant d'analyser les résultats de ces tests de sensibilité, il est nécessaire de présenter la vitesse de friction seuil.

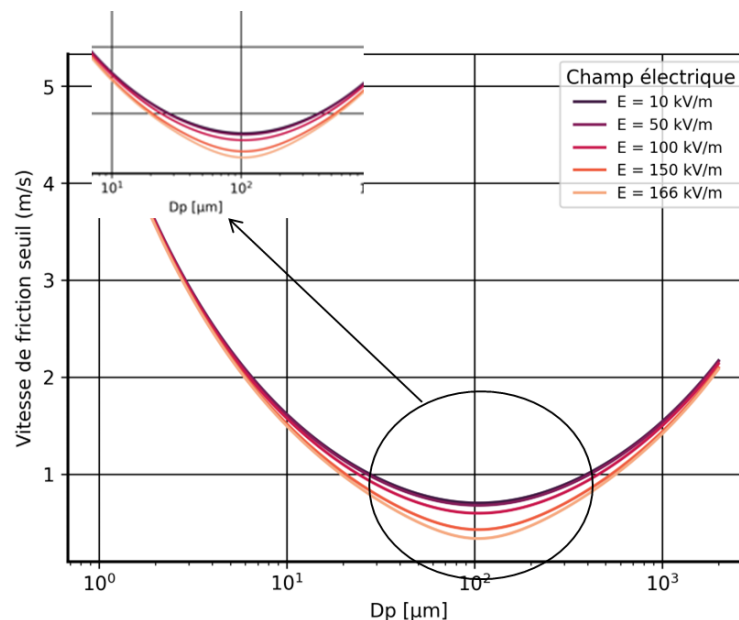


Figure 1 : Réduction de la vitesse de friction seuil en fonction du champ électrique

La Figure 1 présente la variation de la vitesse de friction seuil en fonction du diamètre des particules, pour plusieurs intensités de champs électriques, le maximum étant de 166 kV/m, en accord avec les résultats de (Schmidt, 1998). Elle met en évidence la diminution de la vitesse seuil lorsque le champ électrique augmente. Les tests suivants ont été réalisés sur un sol à distribution granulométrique tri modale (Cf Tableau 1) avec une vitesse de friction u_* réglée au plus près de la vitesse seuil :

Tableau 1 : Granulométrie du sol étudié dans les tests du modèle.

Echantillon (sol)	Amp_1 (%)	Med_1 (μm)	σ_{g1}	Amp_2 (%)	Med_2 (μm)	σ_{g2}	Amp_3 (%)	Med_3 (μm)	σ_{g3}
S1-93	50.6	574	1.56	44.81	222	1.28	4.59	83	1.15

La Figure 2 illustre la variation du flux émis pour chacune des populations du tableau 1, en augmentant le champ électrique. Cette figure met en évidence l'augmentation du flux de saltation lorsque le champ électrique (E) augmente (en accord avec la Figure 1). Elle montre également un basculement de la population dominante : pour $E < 100$ kV/m, la population 3 est majoritairement émise tandis que pour $E > 100$ kV/m, c'est la population 2. Ceci s'explique par le fait que la force électrique est dépendante du diamètre des particules au carré ; ainsi, à champ électrique plus intense, l'effet électrostatique favorise proportionnellement davantage les particules de plus grand diamètre, ce qui déplace la classe modale émise en majorité vers des tailles plus élevées.

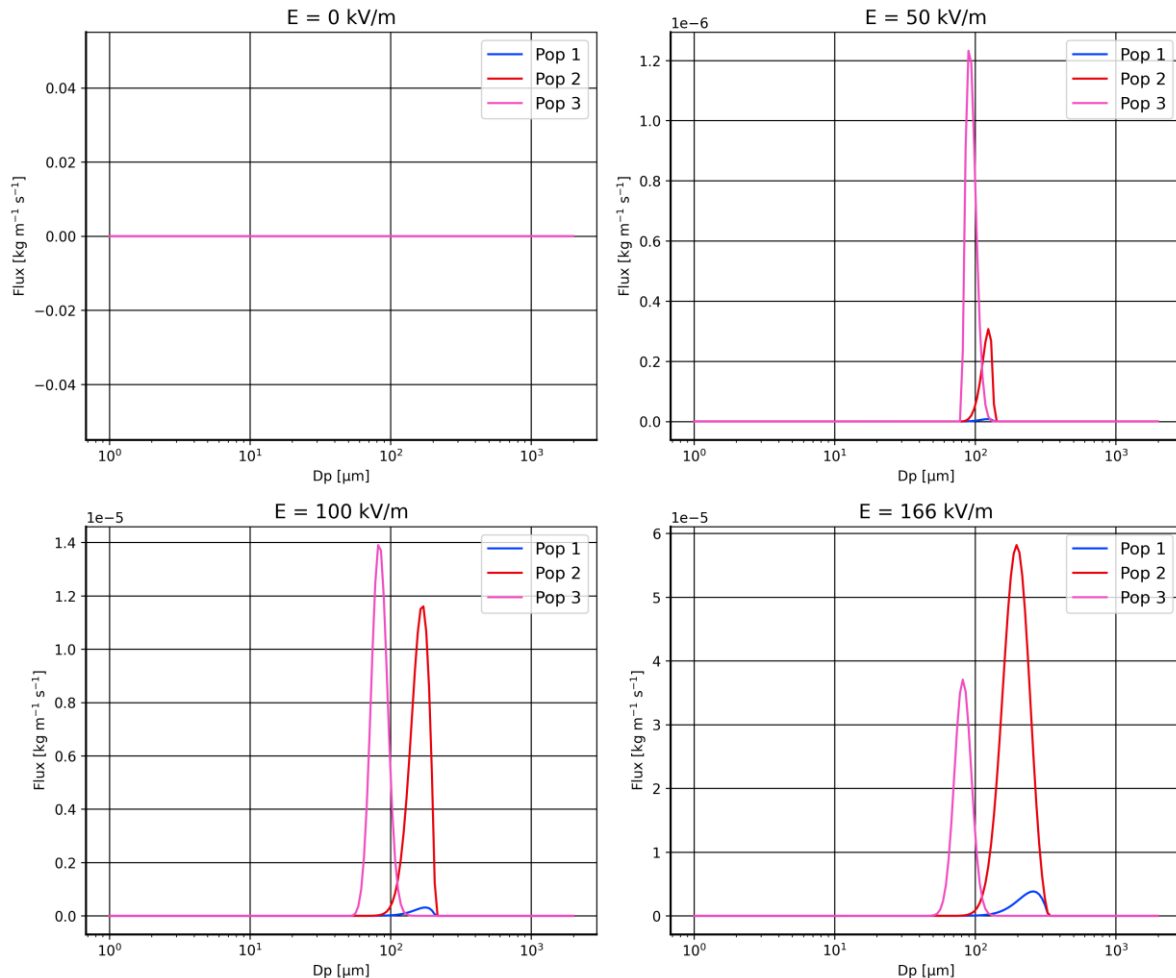


Figure 2 : Variation du flux lors de l'augmentation du champ électrique

3.2. Variation du flux en fonction du champ électrique pour un sol isolant et des particules isolantes

La formulation de Zhang, (2024) prend en compte la contribution d'un champ électrique (E) et la densité de charge surfacique de la particule (σ). Dans les tests suivants, la sensibilité à σ du flux de saltation émis, en fonction de E et σ , est évaluée.

La Figure 3 présente une carte du flux émis en fonction du champ électrique et pour différentes densités de charge surfacique σ . Il y a peu de variation dans l'émission des différentes classes modales, la répartition granulométrique des particules émises restant globalement inchangée. C'est pourquoi cette représentation en carte est plus pertinente ; ici, les paramètres ayant le plus d'influence sont à la fois σ et E . La Figure 3 montre que le flux émis est maximum pour $\sigma = 0$. Ensuite, le flux diminue avec le champ électrique pour $\sigma < 0$, tandis que le flux augmente avec le champ électrique pour $\sigma > 0$. Cependant, lorsque la densité de charge surfacique est élevée ($\sigma = 10 \mu\text{C} / \text{m}^2$), l'émission n'apparaît qu'aux plus fortes valeurs de E .

Flux - influence de σ

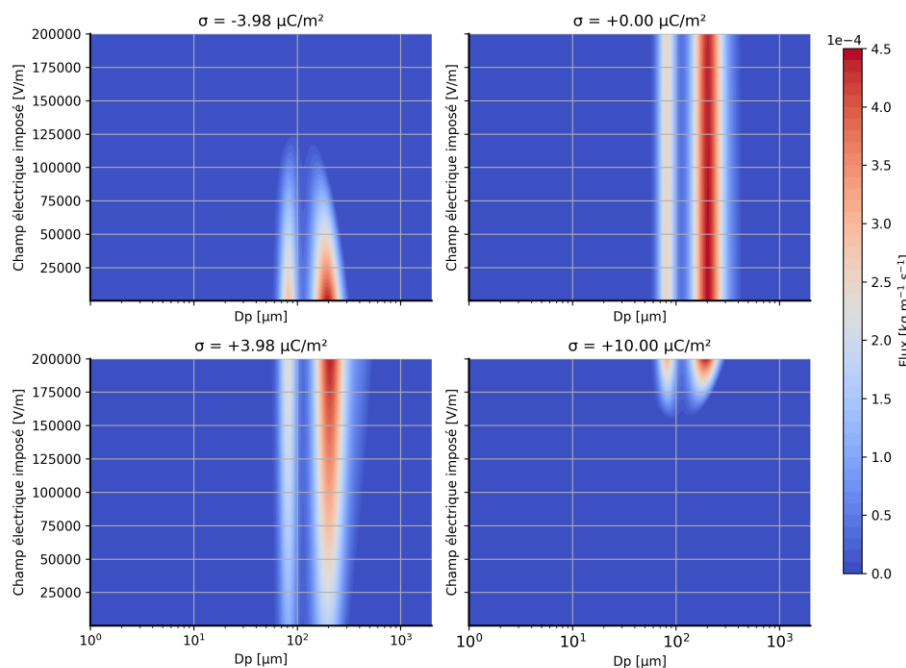


Figure 3 : Carte du flux émis selon la variation du champ électrique et de la densité de charge surfacique de la particule

4. CONCLUSION

Les tests de sensibilité fondés sur les formulations de Kok & Renno, 2006 (cas conducteur) et de Zhang, 2024 (cas isolant) indiquent que le champ électrique influence la vitesse de frottement seuil, avec un basculement de l'émission vers des diamètres de grains plus grands. Pour les particules isolantes, le flux est maximal lorsque la charge moyenne est nulle ; il croît si elles sont chargées positivement et décroît si elles sont négativement chargées. Ces effets, d'un ordre de grandeur comparable à ceux liés à l'humidité et à la cohésion intergranulaire, justifient l'intégration systématique de l'électrostatique dans les modèles et leur validation par des mesures de terrain. Une campagne de terrain aura lieu dans le désert tunisien au printemps 2026 afin d'étudier les interactions entre flux de particules, seuil de mise en mouvement et champs électriques. Une instrumentation dédiée permettra de mesurer l'ensemble des paramètres nécessaires à cette analyse.

5. RÉFÉRENCES

- Huang, X., Gao, W., & Foroutan, H. (2025). Impact of topographic wind conditions on dust particle size distribution: insights from a regional dust reanalysis dataset. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(17), 9583–9600. <https://doi.org/10.5194/acp-25-9583-2025>
- Inculet, I. I., Castle, G. S. P., & Aartsen, G. (2006). Generation of bipolar electric fields during industrial handling of powders. *Chemical Engineering Science*, 61(7), 2249–2253. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.05.005>
- Kok, J. F. (2011). A scaling theory for the size distribution of emitted dust aerosols suggests climate models underestimate the size of the global dust cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(3), 1016–1021. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014798108>
- Kok, J. F., & Renno, N. O. (2006). Enhancement of the emission of mineral dust aerosols by electric forces. *Geophysical Research Letters*, 33(19), 2–6. <https://doi.org/10.1029/2006gl026284>
- Kok, J. F., & Renno, N. O. (2008). The effects of electric forces on dust lifting: Preliminary studies with a numerical model. *Journal of Physics: Conference Series*, 142(December), 6596/142/1/012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/142/1/012047>
- Lacks, D. J., & Levandovsky, A. (2007). Effect of particle size distribution on the polarity of triboelectric charging in granular insulator systems. *Journal of Electrostatics*, 65(2), 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2006.07.010>
- Marticorena, B., & Bergametti, G. (1995). Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *Journal of Geophysical Research*, 100(D8). <https://doi.org/10.1029/95jd00690>
- Renno, N. O., & Kok, J. F. (2008). Electrical activity and dust lifting on earth, Mars, and beyond. *Space Science Reviews*, 137(1–4), 419–434. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9377-5>
- Schmidt, D. S. (1998). *Electrostatic force on saltating sand*. 103, 8997–9001. <https://doi.org/10.1029/98JD00278>
- Zhang, H. (2024). Revisiting the effects of electrostatic forces on the lifting of sand particles in dust storms. *Journal of Electrostatics*, 127(December 2023), 103880. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2023.103880>