

VITESSES DE DÉPÔT SEC DE PARTICULES MICRONIQUES SUR COUVERT D'HERBE

P. Roupsard¹, O. Connan¹, D. Hébert¹, Y. Hamroun¹ et P. Laguionie¹

¹ Laboratoire Expérimental de Recherche et d'expertise sur les Transferts des radionucléides dans l'Atmosphère, Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection, 50130 Cherbourg-en-Cotentin, France

*Courriel de l'orateur : pierre.roupsard@asnrf.fr

TITLE

Dry deposition velocities of micron-sized particles on grass cover

ABSTRACT

In the framework of the TITANS research programme (Horizon Europe), experiments have been carried out to quantify the dry deposition of 4 to 5 µm particles on grass cover. These particles had characteristics similar to those of tritiated concrete particles emitted during the dismantling of nuclear facilities. The experiments were based on the use of non-radioactive particles, generated and dispersed in the environment. A tracer attached to these particles, fluorescein was used to quantify their dry deposition. Dry deposition was quantified by the deposition velocity Vd. Its measurement relied on the use of synthetic grass surrogates. The obtained results are compared with parameterisations and models of the literature and show a dependence of the dry deposition velocity on the turbulence conditions.

RESUME

Dans le cadre du programme de recherche TITANS (Horizon Europe), des expérimentations ont été menées afin de quantifier le dépôt sec de particules de 4 à 5 µm sur un couvert d'herbe. Ces particules présentaient des caractéristiques proches de celles de particules de béton tritierées émises lors des travaux de démantèlement des installations nucléaires. Les expérimentations reposaient sur l'utilisation de particules non radioactives, générées et dispersées dans l'environnement. Un traceur fixé à ces particules, la fluorescéine, a été utilisé pour quantifier leur dépôt sec. Le dépôt sec a été quantifié par la vitesse de dépôt Vd. Sa mesure était basée sur l'utilisation de substrats d'herbe synthétique. Les résultats obtenus sont comparés aux paramétrisations et aux modèles de la littérature et montrent une dépendance de la vitesse de dépôt sec aux conditions de turbulence.

KEYWORDS: Micron-sized particles, Aerosols, Dry deposition, Deposition velocity / **MOTS-CLÉS :** Particules microniques, Aérosols, Dépôt sec, Vitesse de dépôt.

INTRODUCTION

Lors des phases de démantèlement des équipements et des installations de fusion ou de fission nucléaire, des particules tritiées peuvent être produites, notamment en raison du traitement de surface du béton. En cas de perte de confinement lors de ces travaux, des poussières tritiées pourraient être dispersées dans l'atmosphère et conduire à une exposition de l'environnement ou de la population environnante, notamment par leurs dépôts secs (en l'absence de précipitations).

Dans le cadre du programme de recherche TITANS (Tritium Impact and Transfer in Advanced Nuclear ReactorS ; 2022-2025, Horizon Europe Project), les dépôts secs sur couvert d'herbe de particules représentatives de ces particules de béton tritierées doivent être mesurés dans l'environnement lors de campagnes expérimentales. Ces expérimentations doivent être basées sur l'utilisation de particules non radioactives générées et dispersées dans l'environnement (les particules tritiées ne peuvent pas être dispersées intentionnellement dans l'environnement à des fins de recherche).

Les objectifs de cette étude sont de :

- mettre au point une méthode de génération de particules contenant un traceur et présentant les mêmes caractéristiques que les particules de béton tritierées ;
- quantifier les dépôts des particules générées sur couvert d'herbe par temps sec ;
- analyser les résultats et les comparer aux paramétrisations et modèles de la littérature.

1. GÉNÉRATION DE PARTICULES

Sow *et al.* (2020) ont caractérisé la distribution granulométrique de particules de béton mises en suspension par des opérations de rabotage dans un sas de travail. Leur diamètre aérodynamique médian en masse est

de $4,3 \mu\text{m}$, avec un écart-type géométrique de 1,7, leur diamètre optique massique médian est compris entre $4 \mu\text{m}$ et $5 \mu\text{m}$, et leur distribution est polydispersée.

Le générateur de particules utilisé pour générer des particules contenant un traceur est le MICRONICE® 12 μm de TEKCELEO, déjà qualifié par Kort et al. (2022) pour ce type d'utilisation. Son fonctionnement est basée sur l'utilisation d'une membrane micro-perforée vibrante alimentée en solution qui expulse de fines gouttes calibrées au travers des micro-perforations pour former un nuage de microgouttelettes. Une solution contenant un traceur quantifiable, un liquide peu volatil (principal constituant des particules générées) et un solvant volatil qui s'évapore rapidement à la suite de la génération, est utilisée. La distribution granulométrique des particules peut être ajustée en faisant varier les concentrations des composés de la solution. Pour la présente étude, les composés suivants sont utilisés dans les proportions indiquées ci-dessous pour générer les particules :

- traceur : fluorescéine sodée (8 g.L^{-1}), déjà utilisée en environnement par Maro et al. (2014) ;
- constituant principal (liquide peu volatil) : glycérol (7 % volumique) ;
- solvant volatil : éthanol pur (93 % volumique).

La distribution granulométrique des particules générées est caractérisée à partir d'un prélèvement réalisé avec un Low Pressure Impactor de DEKATI Inc. puis une mesure de la fluorescéine avec spectromètre de fluorescence Fluoromax-3 de JOBIN YVON HORIBA, et par mesure directe avec un Electrical Low Pressure Impactor + de DEKATI Inc..

La distribution granulométrique obtenue, cf figure 1, présente un diamètre aérodynamique moyen en masse de $4,8 \mu\text{m}$ avec un écart-type géométrique de 1,9 (ajustement d'une loi lognormal), et un diamètre aérodynamique médian en masse de $4,5 \mu\text{m}$ avec un écart-type géométrique de 2,1 (ajustement d'une droite de Henry).

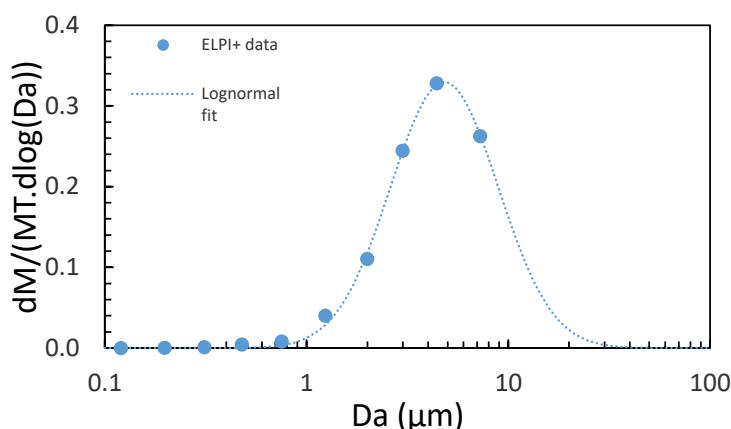


Figure 1. Distribution granulométrique des particules de glycérol et de fluorescéine et loi log-normal ajustée pour la détermination du diamètre aérodynamique moyen massique et de l'écart type géométrique

2. QUANTIFICATION DU DÉPÔT SEC

Le coefficient privilégié pour quantifier le dépôt sec des particules est la vitesse de dépôt sec $V_d (\text{m.s}^{-1})$. Elle est définie comme le rapport de l'opposé du flux de dépôt de particules $F (\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1})$ et de la concentration moyenne en particules dans l'air $C (\text{g.m}^{-3})$ à une hauteur de référence z donnée, généralement 1 m à 1,5 m au-dessus de la surface du sol (équation 1) (Chamberlain et Chadwick, 1953, dans Sehmel, 1980).

$$V_d(z) = \frac{-F}{C(z)} \quad \text{Equation 1}$$

De l'herbe synthétique est utilisée pour l'échantillonnage du dépôt sec des particules sur l'herbe et la détermination du flux de dépôt sec. Les éprouvettes d'herbe synthétique sont déchargées de leur électricité statique avant leur utilisation pour ne pas fausser le flux de dépôt avec un mécanisme normalement absent avec de l'herbe naturelle. Trois groupes de quatre éprouvettes sont placés au sol. Trois porte-filtres équipés de leurs filtres QMA sont placés au ras de chaque groupe d'éprouvettes au niveau du sol, pour échantillonner les particules dans l'air au plus près des éprouvettes. En parallèle, les paramètres micrométéorologiques (vitesse du vent, turbulence, température, humidité relative) et les caractéristiques de la surface (paramètres de rugosité) sont mesurés. Un impacteur en cascade de type Andersen est posé

verticalement au sol à proximité des éprouvettes pour prélever les particules et permettre la détermination de leur distribution granulométrique pendant chaque essai. La durée d'un essai est fixée à 30 min. La figure 2 présente un schéma de principe du dispositif expérimental mis en œuvre pour quantifier des vitesses de dépôt sec par traçage.

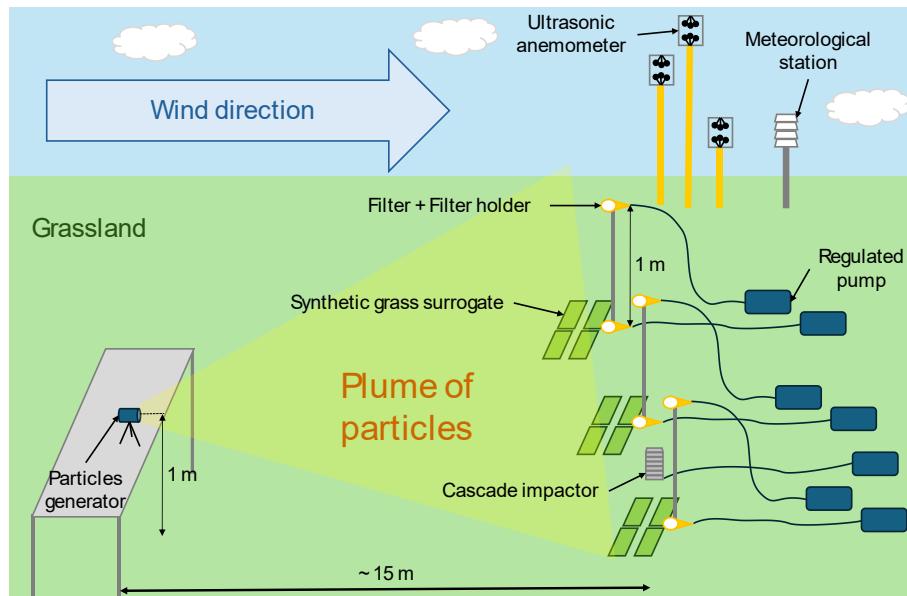


Figure 2. Schéma de principe du dispositif expérimental

Le site retenu pour la réalisation des campagnes d'essais est le site INRAE les Verrines de LUSIGNAN (Vienne, FRANCE). Il se situe en pays mélusin, une zone rurale de prairies, cultures et bosquets au relief peu marqué. Les échantillons sont traités et mesurés dans un laboratoire de campagne où sont installés tous les matériels nécessaires.

3. RÉSULTATS ET ANALYSE

Deux campagnes d'essais de deux semaines ont été menées, l'une du 8 au 19 avril 2024 et l'autre du 12 au 23 mai 2025. Au total, 29 essais ont été réalisés. Les vitesses de dépôt sec V_d ont varié de $6,5 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ à $1,5 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$, soit plus d'un ordre de grandeur, avec une valeur moyenne de $5,2 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ et un écart type de $3,0 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$. Les vitesses moyennes du vent ont varié de $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ à $8,2 \text{ m.s}^{-1}$. Les vitesses de frottement ont varié de $0,07$ à $0,74 \text{ m.s}^{-1}$. La longueur de rugosité était de l'ordre de 2 cm. Les flux de chaleur sensible ont varié entre $1,79$ et $162,97 \text{ J.m}^{-2}.s^{-1}$. Les longueurs de Monin-Obukhov ont varié entre -1875 et 2,44 m, ce qui est représentatif de conditions atmosphériques neutres et instables, voire très instables pour certains essais. Les conditions micrométéorologiques rencontrées pendant les campagnes d'essais ont donc été variées, la plupart des essais ayant été réalisés dans des conditions instables et quatre cas en conditions neutres. Aucun essai n'a été réalisé dans des conditions stables.

Les vitesses de dépôt sec V_d montrent une tendance croissante pour des vitesses de frottement croissantes. Les vitesses de dépôt sec V_d sont aussi sensiblement plus importantes pour les flux de chaleur les plus importants, particulièrement ceux supérieurs à $50 \text{ J.m}^{-2}.s^{-1}$, par rapport aux vitesses de dépôt mesurées pour des flux de chaleur inférieurs à $30 \text{ J.m}^{-2}.s^{-1}$. Ces résultats illustrent la grande sensibilité du dépôt sec de ces particules aux conditions de turbulence.

Les vitesses de dépôt sec sont comparées à celles calculées avec les paramétrisations "lisse" et "rugueuse" du modèle de Giardina et Buffa (2018) (cf. figure 3). La formulation du modèle de Giardina et Buffa (2018) adaptée aux surfaces herbeuses est celle pour les surfaces lisses. La figure 3 montre que cette formulation du modèle sous-estime systématiquement les vitesses de dépôt obtenues expérimentalement. Cependant, la formulation du modèle pour les surfaces rugueuses surestime systématiquement les vitesses de dépôt sur l'herbe.

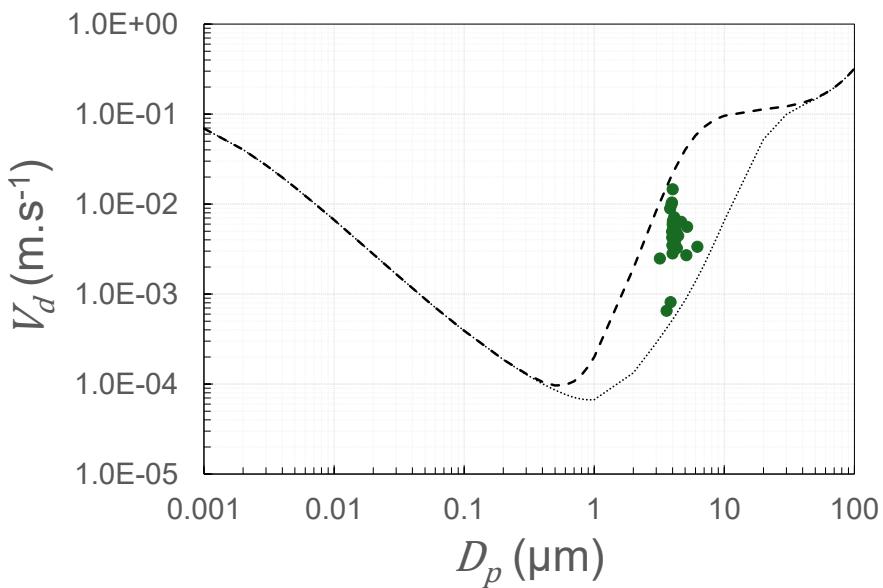


Figure 3. Vitesse de dépôt sec V_d en fonction du diamètre des particules D_p
Données expérimentales : ● ; Giardina et Buffa (2018) : surface « lisse », --- surface « rugueuse »

Les indicateurs statistiques FAC2 et FAC5 sont respectivement égaux à 0,11 et 0,25 pour le modèle “lisse” et à 0,14 et 0,50 pour le modèle “rugueux”. La formulation de la résistance de l’impaction inertiel proposée dans l’équation 2 permet de réduire ces écarts.

$$r_{ii} = \frac{1}{u_* \left(\frac{St^2}{St^2 + 20} \right)} \quad \text{Equation 2}$$

Les indicateurs statistiques FAC2 et FAC5 sont alors respectivement égaux à 0,50 et 0,82.

CONCLUSIONS

Dans le cadre du programme de recherche TITANS, les dépôts secs sur l’herbe de particules représentatives des particules de béton tritié remises en suspension lors des travaux de démantèlement ont été mesurés lors de campagnes expérimentales dans l’environnement. Ces expériences ont utilisé des particules de glycérol marquées à la fluorescéine. Ces particules ont été générées directement dans l’atmosphère et dispersées sur les parcelles d’herbe de la zone d’essai. Le dépôt sec a été quantifié par la vitesse de dépôt V_d . Sa mesure s’est appuyée sur l’utilisation de substrats d’herbe synthétique pour déterminer les flux de dépôt et sur l’échantillonnage des particules sur des filtres pour déterminer les concentrations dans l’atmosphère associées aux flux de dépôt. Les résultats obtenus montrent une dépendance de la vitesse de dépôt sec aux conditions de turbulence, augmentant avec la vitesse de frottement. Les données ont été comparées au modèle de dépôt sec de Giardina et Buffa (2018), mettant en évidence des écarts. Une correction de la formulation de la résistance de l’impaction inertiel est proposée pour réduire ces écarts.

RÉFÉRENCES

- Giardina M., Buffa P. (2018). A new approach for modeling dry deposition of particles. *Atmospheric Environment* 180. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.02.038>.
- Kort A., Juvel Fauvel L., Le Roux N., Gensdarmes F. (2022) Qualification d’une buse de nébulisation pour la génération d’aérosols calibrés. 35ème Congrès Français Sur les Aérosols, PARIS, France.
- Maro D., Connan O., Flori J.P., Hébert D., Mestayer P., Olive F., Rosant J.M., Rozet M., Sini J.F., Solier L. (2014). Aerosol dry deposition in the urban environment: assessment of deposition velocity on building facades. *Journal of Aerosol Science* 69. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.12.001>.
- Sehmel G. A. (1980). Particle and gas dry deposition: a review. *Atmospheric Environment* 14. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(80\)90031-1](https://doi.org/10.1016/0004-6981(80)90031-1).
- Sow M., Leblois Y., Bodiot C., Motzkus C., Ritoux S., Gensdarmes F. (2020). Aerosol release fraction by concrete scarifying operations and its implications on the dismantling of nuclear facilities. *Journal of Hazardous Materials* 400 (123077). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123077>.