Modélisation des courbes d'évolution des mesures nucléaires dégradées par des aérosols

G. Dougniaux[1*]

[1]Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSN-RES/SCA/LPMA, F-91400, Saclay, France
*gregoire.dougniaux@irsn.fr

TITLE

Modeling the evolution curves of nuclear measurements degraded by aerosols

RESUME

Dans les installations nucléaires, la surveillance obligatoire de la contamination aéroportée est opérée par des instruments dédiés (CAM – *Continuous Air Monitor*) qui collectent les aérosols sur un filtre, mesurent la radioactivité déposée et déclenchent une alarme lorsqu'un seuil prédéterminé en activité est dépassé. Cette mesure et donc les alarmes sont très influencées par les variations en taille et concentration des aérosols.
Sur la base d'un ensemble de données préalablement constitué, un processus d'ajustement nouveau permet de chercher à mettre en relation la masse déposée sur un filtre de prélèvement et l'évolution de la mesure nucléaire. Cette relation a pu être établie pour une dimension d'aérosol et doit être étendue aux autres dimensions d'aérosols de la base de données. Il s'agit ici de la première relation explicite entre les évolutions des mesures nucléaires et celle des aérosols.

ABSTRACT

In nuclear facilities, the mandatory airborne contamination surveillance is operated by dedicated Continuous Air Monitors (CAM) that collect all airborne aerosol on a filter, measure the radioactivity and trig an alarm when a predetermined activity concentration is exceeded. This measurement and therefore the alarms are very integrated by the variations in size and concentration of the aerosols. A new adjustment process can be used to establish a relationship between the mass deposited on a sampling filter and the evolution of the nuclear measurement, based on a previously assembled data set. This relationship has been established for one aerosol dimension and requires extension to the other aerosol dimensions in the database. This represents the first explicit relationship between changes in nuclear measurements and changes in aerosols.

MOTS-CLÉS : Spectre alpha, CAM, aérosol / **KEYWORDS:** Alpha spectrum, CAM, aerosol

1. INTRODUCTION

Sur les sites nucléaires, et en particulier les chantiers de démantèlement, des moniteurs de la radioactivité aéroportée sont déployés afin de s'assurer que les valeurs cibles de radioprotection des travailleurs sont respectées. Pour ce faire, ce type d'instrument prélève les aérosols de l'air ambiant en continu sur un filtre et mesure en temps réel la radioactivité accumulée sur ce filtre. Il doit alerter les personnels en cas de détection d'une contamination atmosphérique.
Pour la détection des émetteurs alpha artificiels (par exemple le ^{239}Pu), il doit estimer en continu et en temps réel la contribution des descendants du radon qui interfère dans la voie de mesure alpha artificielle (Hayes, 2003; Hoover & Newton, 1998; Justus, 2021; Li et al., 2013). En temps normal, cette estimation est très correctement faite mais, dans le cas particulier des chantiers de démantèlement, les variations soudaines de l'ambiance aérosols, tant en termes de granulométrie qu'en concentration, entraînent une modification de la mesure nucléaire, ce qui se traduit par une estimation du bruit de fond incorrecte et *in fine* une surestimation de l'activité alpha artificielle. Cela peut conduire à une fausse alarme et à un arrêt de chantier (Dougniaux et al., 2016). Afin d'améliorer l'estimation du bruit de fond, il a été montré que la prise en compte de la distribution granulométrique de l'aérosol était nécessaire (Hoarau, 2020; Hoarau et al., 2022). Une base de données conséquente a alors été constituée sur le banc d'essais ICARE de l'IRSN (Ammerich, 1989), mettant en relation les mesures nucléaires (spectre intégré et courbes d'évolution temporelle) et les caractéristiques des aérosols.
On se propose d'étudier, à partir de ces données, s'il est possible de trouver une fonction ad hoc permettant d'ajuster correctement les courbes d'évolution à partir d'un spectre de référence. Cette fonction sera mise en relation avec les différentes caractéristiques des aérosols connues afin d'en extraire une loi de comportement.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2025-43872 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Description des données

La base de données acquise en laboratoire consiste en 63 mesures. Une mesure est l'enregistrement du spectre en énergie mesuré par le moniteur pendant les deux heures qui suivent l'événement de remise en suspension dont la durée est inférieure à 2 minutes, d'une poudre d'alumine connue. Dans le même temps, le moniteur va prélever un aérosol de CsCl marqué des descendants du ^{222}Rn. Le tableau 1 présente ce dernier (noté S) ainsi que les quatre granulométries (notées de A à D) utilisées. De plus, chaque événement de remise en suspension conduit à une masse d'aérosols déposés sur le filtre de 0,5 à 15 mg. Finalement, la base de données est composée de 63 spectres de référence.

Tableau 1 : Caractéristiques des aérosols pendant les essais

Identifiant	S	A	B	C	D
Matière	CsCl	SPM105 – Al_2O_3	SPM102 – Al_2O_3	SPM95 – Al_2O_3	SPM84 – Al_2O_3
DAMM (µm)	0,2	9	13	18	57
σ_g	1,8	1,9	1,8	1,3	1,4
χ	1,08	1,6	1,5	1,6	1,2

DAMM : diamètre aérodynamique médian en masse
σ_g : écart-type géométrique
χ : facteur de forme dynamique

La figure 1 présente deux spectres en énergie tels que mesurés par le moniteur. Ce dernier est un ABPM203M (Mirion), que l'on désigne fréquemment sous l'acronyme anglais de CAM (*Continuous Air Monitor*). On note aisément sur cet exemple les différences entre le spectre noir, mesure de référence sans aérosol grossier, et le spectre orange, notablement affecté par l'aérosol de type C. Les courbes d'évolution montrent bien l'influence que cette brusque bouffée d'aérosol a eu sur les mesures : les rayonnements alpha émis pas les poloniums perdent de l'énergie dans le dépôt d'aérosol, ce qui conduit à une augmentation de la quantité d'alphas mesurés dans les fenêtres d'énergie plus basse, notamment la ROI1 (*Region Of Interest*), celle dédiée aux alphas artificiels.

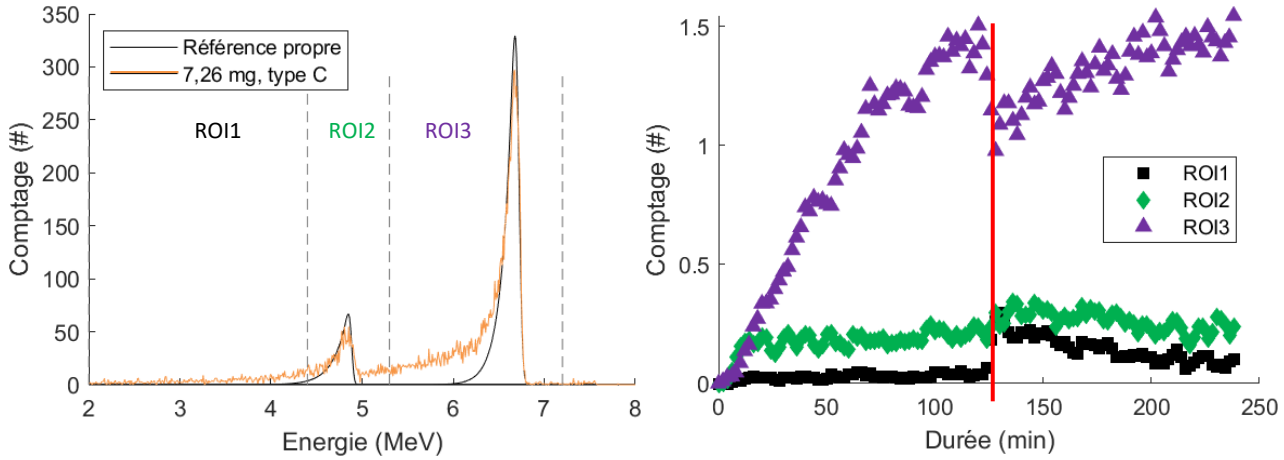

Figure 1 – Exemple d'un résultat de mesure. Sur le graphique de gauche : en noir le spectre de référence non dégradé, lié à l'aérosol de type S, et en orange un spectre dégradé lié à l'aérosol de type C. Sur le graphique de droite, les évolutions temporelles menant au spectre orange : en triangle violet, l'évolution du taux de comptage dans la voie ROI3, liée au ^{214}Po ; en losange vert, l'évolution du taux de comptage dans la voie ROI2, attachée au ^{218}Po ; en carré noir, l'évolution du taux de comptage dans la voie ROI1, dédiée aux émetteurs alphas artificiels. Le trait vertical rouge marque le moment d'injection de l'aérosol de type C.

2.2. Modèle d'ajustement

Ce processus d'ajustement est en plusieurs étapes. Premièrement, il est nécessaire d'avoir un ajustement des deux pics de poloniums dans des conditions de référence (Figure 1, pics noirs), sans aérosol grossier. Pour cela, le modèle de Bortels & Collaers (1987) est utilisé. Un pic alpha est modélisé par une fonction résultant de la convolution d'une fonction gaussienne et de deux exponentielles.
Ensuite, il faut modéliser les courbes d'évolution sans dégradation. Islam & Haque (1994) ont établi les équations adéquates pour représenter à la fois l'accumulation des poloniums sur le filtre et leur décroissance conduisant à un équilibre.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2025-43872 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

Puis, à chaque pas de temps, un spectre $S_{total}(t)$ est déterminé. Les pics ont été définis à la première étape, $S_{Po\text{-}21\text{-}}(t)$, et leurs tailles sont connues par la seconde étape, $IH_{Po\text{-}21\text{-}}(t)$. On obtient donc un ensemble de spectres en fonction du temps et, en sélectionnant les trois ROI, les courbes d'évolution, illustrées par les courbes en pointillés, figure 2.
Il faut alors déformer ces spectres pour ajuster aux courbes d'évolution mesurées. Cette déformation est modélisée par la convolution des spectres $IH_{Po\text{-}21\text{-}}(t) \times S_{Po\text{-}21\text{-}}(t)$ avec une loi exponentielle, dans la même idée que Bortels & Collaers. Cette loi exponentielle dépend d'une fonction $\tau(t)$ dont on va étudier la relation avec les caractéristiques de l'aérosol (concentration ou diamètre médian). :

$$S_{total}(t) = \left(IH_{Po-218}(t) \times S_{Po-218}(t) + IH_{Po-214}(t) \times S_{Po-214}(t)\right) * \begin{cases} 1, & t < event \\ e^{-\frac{t}{\tau(t)}}, & t \geq event \end{cases}$$

Avec :

- $S_{total}(t)$ l'évolution du spectre total,
- $S_{Po\text{-}21\text{-}}(t)$ les spectres de référence modélisés à partir d'un spectre propre (spectre noir, figure 1),
- $IH_{Po\text{-}21\text{-}}(t)$ les activités théoriques déterminées à partir des équations de Islam et Haque.

3. RÉSULTATS

La figure 2 présente le résultat du processus d'ajustement.

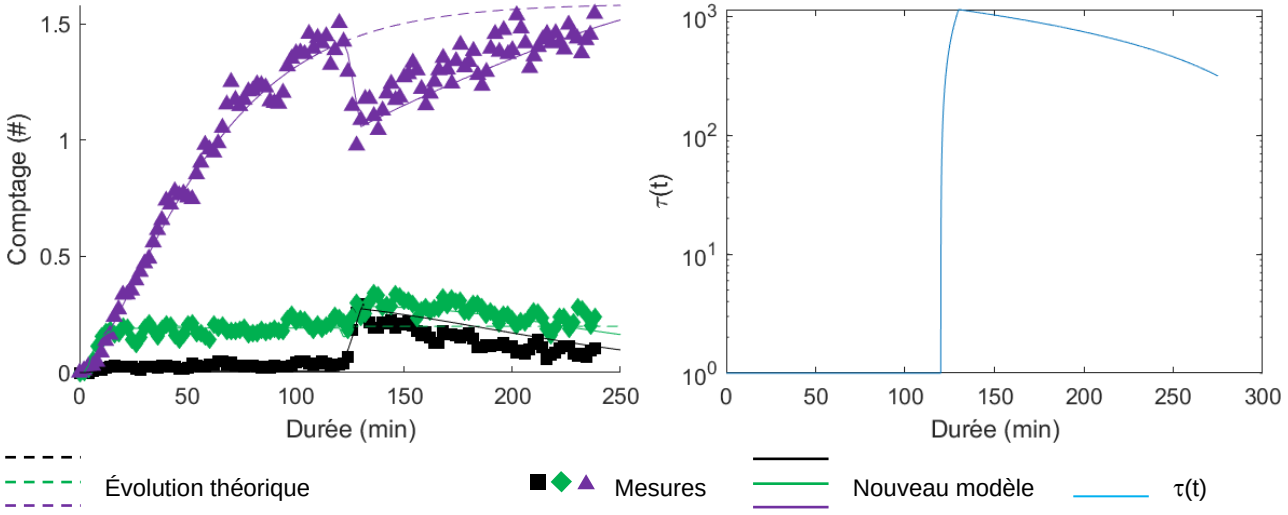

Figure 2 – Courbes d'évolution ajustées et fonction $\tau(t)$ correspondante.

En réalisant cette opération sur tous les spectres de la base de données pour l'aérosol de type C, les valeurs maximales de $\tau(t)$ semblent être alignées sur une même droite en fonction de la masse (Figure 3).

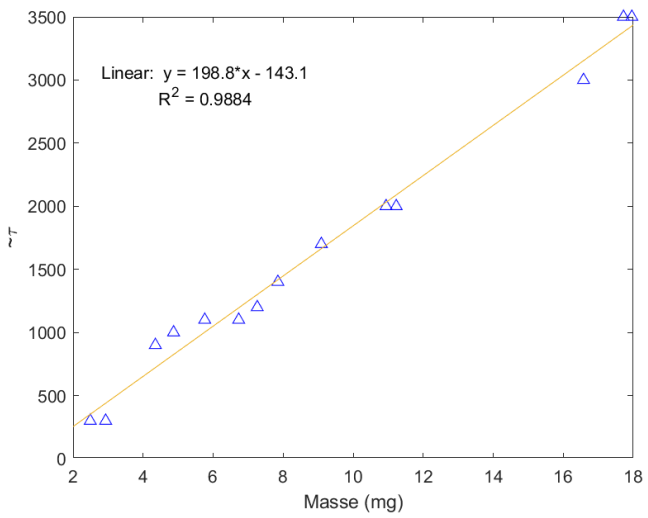

Figure 3 – Relation entre les valeurs maximales de $\tau(t)$ pour les mesures liées à l'aérosol de type C et la masse d'aérosol déposée sur le filtre.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2025-43872
Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

Ce processus doit être étendu aux autres dimensions d'aérosols de la base de données, mais donnent des résultats très encourageants. S'il est validé, ce sera une première relation explicite entre les évolutions des mesures nucléaires et celle des aérosols.

4. CONCLUSION

L'étude menée sur les moniteurs de radioactivité aéroportée déployés sur les sites nucléaires, en particulier les chantiers de démantèlement, a mis en lumière plusieurs points cruciaux pour améliorer la précision des mesures de radioactivité alpha artificielle. Les variations soudaines de l'ambiance aérosols, tant en termes de granulométrie qu'en concentration, peuvent entraîner des estimations incorrectes du bruit de fond, conduisant à des fausses alarmes et à des arrêts de chantier injustifiés.

Pour pallier ces problèmes, il a été démontré que la prise en compte de la distribution granulométrique de l'aérosol est essentielle. Une base de données conséquente a été constituée sur le banc d'essais ICARE de l'IRSN, mettant en relation les mesures nucléaires et les caractéristiques des aérosols. Cette base de données a permis d'étudier la possibilité de trouver une fonction ad hoc pour ajuster correctement les courbes d'évolution à partir d'un spectre de référence.

Le modèle d'ajustement proposé, basé sur la convolution des spectres avec une fonction exponentielle, a montré des résultats très encourageants. La détermination de la fonction $\tau(t)$ intervenant dans cette exponentielle a permis d'ajuster correctement les trois régions d'intérêt (ROI). Les valeurs maximales de $\tau(t)$ semblent être alignées sur une même droite en fonction de la masse, ce qui tend à confirmer l'existence d'une relation entre les évolutions des mesures nucléaires et celles des aérosols.

Ces résultats préliminaires sont prometteurs et doivent être étendus aux autres dimensions d'aérosols de la base de données. S'ils sont validés, ils pourraient constituer une avancée significative dans la compréhension et la gestion des mesures de radioactivité sur les sites nucléaires, contribuant ainsi à une meilleure sécurité et efficacité des opérations de démantèlement.

RÉFÉRENCES

Ammerich, M. (1989). *Réalisation d'une installation d'étalonnage de moniteurs de contamination atmosphérique à l'aide d'aérosols radioactifs calibrés (ICARE)* (CEA-R-5484).

Bortels, G., & Collaers, P. (1987). Analytical function for fitting peaks in alpha-particle spectra from Si detectors. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A*, *38*(10), 831–837. https://doi.org/10.1016/0883-2889(87)90180-8

Dougniaux, G., Monsanglant-Louvet, C., Teppe, A.-L., Marcillaud, B., Dieux Lestaevel, B., Gensdarmes, F., Michielsen, N., Bondiguel, S., Boussetta, B., & Quentel, G. (2016). Results from a measurement campaign in dismantling nuclear sites: a study of the false alarms emitted by CAM. *European Aerosol Conference*.

Hayes, R. B. (2003). False CAM alarms from Radon fluctuations. *The Radiation Safety Journal*, *85*(2), S81–S84.

Hoarau, G. (2020). *Étude De La Limite De Détection Et Des Fausses Alarmes Émises Par Les Moniteurs De Mesure De La Contamination Radioactive Atmosphérique Dans Les Chantiers De Démantèlement* [Université Paris-Saclay]. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03033575

Hoarau, G., Dougniaux, G., Gensdarmes, F., Cassette, P., & Ranchoux, G. (2022). Impact of the Coarse Indoor Non-radioactive Aerosols on the Background Radon Progenies' Compensation of a Continuous Air Monitor. *Health Physics*, *122*(5), 563–574. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001530

Hoover, M. D., & Newton, G. J. (1998). Performance testing of continuous air monitors for alpha-emitting radionuclides. *Radiation Protection Dosimetry*, *79*(1–4), 499–504.

Islam, G. S., & Haque, A. K. F. (1994). Measurement of mixed radon and thoron daughter concentrations using alpha and beta activities filtered from air. *Radiation Measurements*, *23*(4), 737–742. https://doi.org/10.1016/1350-4487(94)90011-6

Justus, A. (2021). Technical Details of the Sigma Factor Alarm Method within Alpha CAMs. *Health Physics*, *120*(4), 442–453. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001341

Li, H., Jia, M., & Wang, K. (2013). Critical level setting of continuous air monitor. *Radiation Protection Dosimetry*, *154*(3), 391–395. https://doi.org/10.1093/rpd/ncs250