

UDC 624

EVALUATION EXPERIMENTALE DE LA QUALITE DE L'AIR
INTERIEUR : DECHARGE PARTICULAIRE EN MODELE REDUIT
CONTROLE

Limam K. ^{a}, Savytskyi M. ^b, Koval O. ^b,
Babenko M. ^b, Konoplyanik A. ^b, Benhamou B. ^c*



^aLaboratory of engineering sciences for environment (LaSIE), University of La Rochelle, France

^bAcademy of Civil Engineering and Architecture", Dnipropetrovsk (Ukraine)

^cEnR2E Laboratory, CNEREE Cadi Ayyad University, Merrakech (Morocco)

Introduction. Lorsqu'une particule est en mouvement dans une ambiance ventilée du bâtiment, elle est transportée sous l'action locale des écoulements de l'air et des différentes forces (diffusion moléculaire, gravité, forces radiométriques...) qui peuvent s'exercer sur elle, l'amenant parfois à entrer en contact avec les parois. Monn C. [1] a montré que l'activité humaine conduit à une augmentation de la concentration pour les particules fines (<0.4µm) et grosses (>12.5µm) mais aucun changement n'est observé pour les particules de taille intermédiaire, sachant que les vitesses d'air dans le bâtiment restent trop faibles pour ré-entraîner certaines des particules déposées. Les phénomènes de dépôt et de remise en suspension étant très difficiles à évaluer indépendamment l'un de l'autre, il est habituel comme le souligne Lange C. [2] de considérer un effet global que l'on nomme communément « dépôt » (ou « décharge » de l'air en polluant). L'approche globale permet de regarder l'ensemble des particules (supposées uniformément réparties dans le volume) qui nous intéresse par son comportement global vis à vis de l'ambiance. L'ensemble des phénomènes agissant sur les particules (par exemple la ventilation de l'ambiance ou encore la rugosité des parois) va affecter un paramètre unique *la constante de dépôt* qui peut être mesurée expérimentalement et que l'on va définir ci-après.

Modèle. Le modèle de Nazaroff W.W. [3] nous donne le bilan de conservation massique dans une enceinte monozone où l'on suppose que la concentration en particules, la température et l'humidité relative de l'air sont uniformes dans le domaine. L'équation 1 ci-après donne alors l'évolution de la concentration intérieure au cours du temps:

$$\frac{dC_i}{dt} = \lambda_r C_{ext} - \lambda_r C_i - \lambda_{de} C_i - \lambda_R D_i \quad (1)$$

Avec :

C_i : Concentration intérieure de particules dans l'air (kg /m³),

C_{ext} : Concentration extérieure de particules dans l'air (kg /m³),

D_i : Concentration de particules déposées (kg /m³)

λ_r : Coefficient de renouvellement d'air (s⁻¹),

λ_{de} : Paramètre de dépôt (s⁻¹),

λ_R : Paramètre de resuspension (s⁻¹)

l'équation 1 devient alors:

$$\frac{dC_i}{dt} = \lambda_r C_{ext} - \lambda_r C_i - \lambda_{dépôt} C_i \quad (2)$$

Par la connaissance de la constante de décharge ($\lambda_{dépôt}$) on peut déterminer la concentration en particules dans l'air d'une enceinte monozone où les caractéristiques du volume étudié sont alors pris en compte dans la formulation de la « vitesse de décharge » qui représente globalement la vitesse à laquelle une particule migre vers une paroi avec une certaine probabilité d'adhérer à cette paroi:

$$V_{décharge} = \frac{\text{Volume total de la zone}}{\text{Surface intérieure totale}} \times \lambda_{dépôt} \quad (3)$$

Dans une enceinte fermée (sans taux de renouvellement d'air) la solution de l'équation (2) est donnée par la relation:

$$C_{int}(t) = C_{int}(0) \exp(-\lambda_{dépôt} t) \quad (4)$$

Cette dernière relation traduit qu'au cours du temps, le volume d'air intérieur initialement chargé de particules en mouvement va voir sa concentration particulaire baisser, $\lambda_{dépôt}$ étant liée à l'enceinte (ses caractéristiques géométriques, son niveau de d'agitation, les caractéristiques des parois) mais aussi aux conditions de température et d'humidité de l'air intérieur.

Lorsqu'on remonte aux travaux précurseurs d'Offermann F.J. [4] concernant des mesures sur site de dépôts particulaires, on s'aperçoit que la modélisation repose essentiellement sur la définition de la constante $\lambda_{dépôt}$ qui caractérise la migration des particules de l'air vers les surfaces réceptrices (surfaces qui ne sont d'ailleurs pas caractérisées).

A partir de 1996, Thatcher T.L. ([5] et [6]) étudie le dépôt en convection naturelle sur des revêtements se rapprochant un peu plus de ceux rencontrés à l'intérieur des bâtiments. Les auteurs précisent les revêtements étudiés en les baptisant de "lisse", "rayé" ou encore "texturé", description restant vague et ne permettant qu'une classification qualitative.

D'autres travaux ont suivi, mais de gros écarts subsistent quant aux résultats. Par exemple pour des particules de diamètre 2 μm , on observe un facteur 10 entre les résultats de la vitesse de dépôt, obtenus par Roed J. [7] et Byrne M.A. [8] ($2 \cdot 10^{-4}$ m/s) et ceux de Adam N. [9] ($2 \cdot 10^{-5}$ m/s). Cependant l'inconvénient majeur concernant ces mesures sur site est qu'elles sont difficilement extrapolables à d'autres configurations géométriques et aérauliques.

Afin de mieux maîtriser les facteurs influençant les écoulements d'air, la température de l'air ou encore celle des parois d'une ambiance, divers expérimentations sur maquettes ont alors été effectuées ([10], [11], [12], [8]). Mais aucune de ces études ne fournit de données précises sur les revêtements de surface utilisées bien que la rugosité des revêtements soit directement liée aux phénomènes

de dépôt particulaire. Constatant d'une part que toutes les études évoquées précédemment voient leurs limites en leurs faibles variétés de surfaces employées, d'autre part que les caractéristiques des particules sont d'habitude bien déterminées mais au détriment de la caractérisation des revêtements de parois, nous avons orienté nos recherches sur la base d'un modèle réduit ce qui permet d'être dans les hypothèses du modèle de [3], à savoir l'homogénéité de la répartition en polluant dans l'ambiance étudiée.

Dispositif expérimental mise en place

Notre dispositif expérimental est présenté par la figure 1 ci-après et celui-ci est composé: d'une enceinte expérimentale (1) munie de son agitateur à hélice (2), d'un compteur de particule (3) piloté par un ordinateur (4), et d'un générateur d'aérosol (5). L'enceinte confinée représentée ci-dessus est de dimensions $0.6 \times 0.6 \times 0.6$ m, ses parois peuvent être recouvertes par différents revêtements. L'agitateur à hélices placé en partie centrale haute est dirigé vers le bas et permet d'assurer les cycles de brassage de l'air intérieur pendant toute la durée de l'expérimentation. Un tube d'injection est placé à 15 cm de l'axe de l'agitateur et un tube de prélèvement positionné au centre du volume, est relié à un compteur de particule.

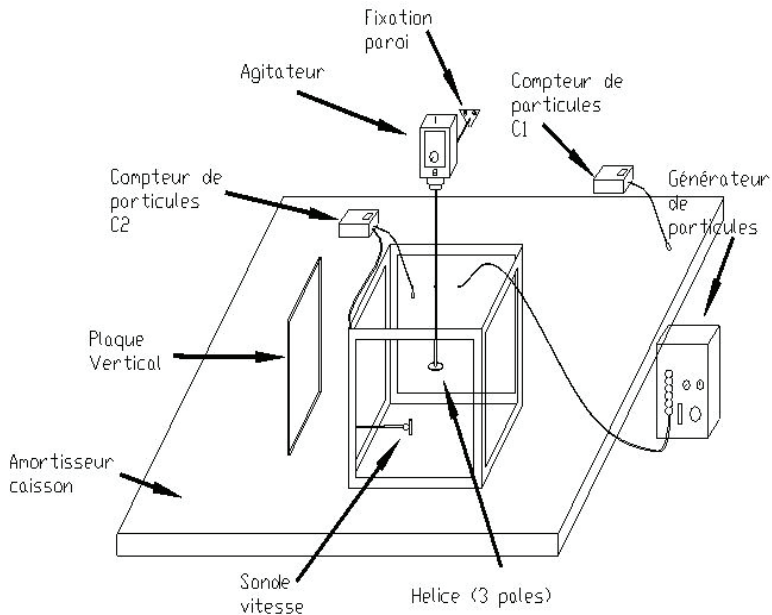


Figure 1.a . Schéma du dispositif expérimental

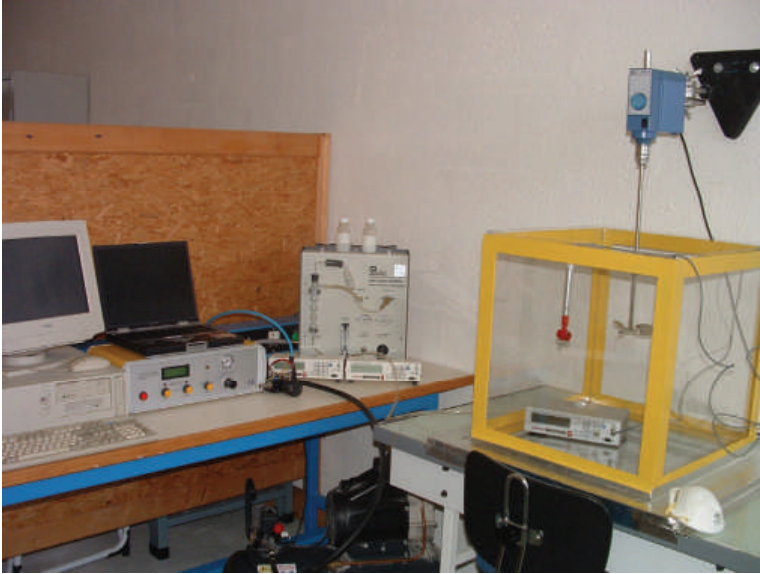


Figure 1.b. Dispositif expérimental LaSIE

Les trois tailles de particules injectées ($0.7\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$ et $5.0\mu\text{m}$ évoqués plus haut) ont été choisies car elles permettent de passer d'une taille classée dangereuses $0.7\mu\text{m}$ (susceptible d'accéder jusqu'aux alvéoles pulmonaires) à une taille pouvant être stopper dans la partie supérieure des poumons (et il s'agit là des $5\mu\text{m}$). Le principe sur lequel est basé ce dispositif ventilé est le suivant: les revêtements testés vont tout simplement contribuer à décharger l'air intérieur en faisant décroître au cours du temps et de façon exponentielle la concentration intérieure en particule (selon la relation $\frac{dC_i}{dt} = -\lambda_{\text{dépôt}} C_i$, avec C_i la concentration intérieure de

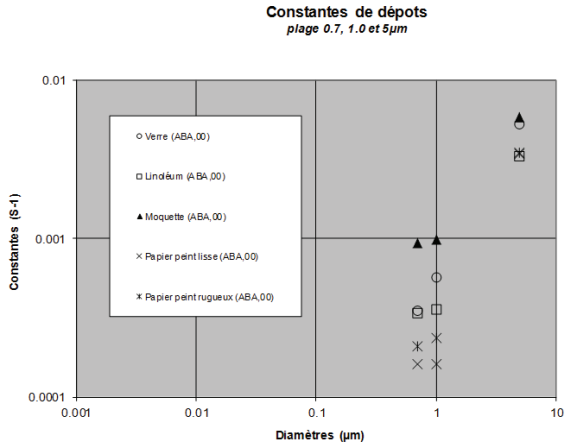
particules dans l'air), ce qui nous permet de mesurer le paramètre $\lambda_{\text{dépôt}}$ (s^{-1}) pour différents revêtements intérieurs du bâtiment mise à l'épreuve dans l'enceinte. Ce paramètre n'est autre que la pente de la décroissance exponentielle du nombre de particules calibrées présentes dans l'ambiance. L'obtention du paramètre $\lambda_{\text{dépôt}}$ (s^{-1}) pour différents revêtements intérieurs du bâtiment mise à l'épreuve dans l'enceinte permet alors de considérer selon la taille des particule et selon la prise en compte ou pas de la position des parois, un dépôt global du polluant particulaire pour un niveau d'agitation donné.

Par rapport à M. Abadie [13], nous avons grâce à un dispositif similaire mais amélioré car mieux contrôlé, élargi nos investigations pour d'autres revêtements.

La figure 2 ci-dessous, nous donne les mesures de $\lambda_{\text{dépôt}}$ que nous avons effectuées à l'intérieur de l'enceinte pour chaque couple {particule–revêtement}

(les 6 faces du caissons ayant le même revêtement, K. Limam [14]). Deux tendances apparaissent nettement quant aux valeurs obtenues pour les constantes de dépôt :

- d'une part les matériaux fortement électrostatiques (verre, moquette) se démarquent par rapport aux autres (papier peint, bois),
- d'autre part c'est pour des particules supmicroniques que les matériaux se différencient très nettement les uns des autres (écart important entre les valeurs de $\lambda_{\text{dépôt}}$, contrairement aux particules de $5\mu\text{m}$ pour lesquels les valeurs de $\lambda_{\text{dépôt}}$ restent voisines.



Les tableaux 1.a et 1.b (respectivement $3\mu\text{m}$ et $5\mu\text{m}$) donnent les nouvelles valeurs obtenues pour de nouveaux matériaux :

Tableau 1.a

Constantes de dépôt $3.0\mu\text{m}$

Revêtement	Constante de dépôt (h^{-1})	Ecart-Type
Aluminium	5.10	0.50
Verre anti-statique	8.61	0.52
Bois Contre-Plaqué (CP)	4.15	0.59
CP peinture à l'eau	5.75	0.60
CP peinture à l'huile microporeuse	6.94	*
CP peinture à l'huile standard	6.83	0.34
Panneaux Faux-Plafond	11.27	2.48
Laine de Roche		
Panneaux Polystyrène	9.99	2.00

Tableau 1.b.

Constantes de dépôt 5.0µm

Revêtement	Constante de dépôt (h^{-1})	Ecart-Type
Aluminium	5.35	1.18
Verre anti-statique	11.30	0.21
Bois contre-plaqué (CP)	5.12	0.27
CP peinture à l'eau	6.50	0.00
CP peinture à l'huile microporeuse	6.91	*
CP peinture à l'huile standard	7.81	0.55
Panneaux Faux-Plafond	12.50	1.90
Laine de Roche		
Panneaux Polystyrène	10.70	1.18

(*) une seule mesure réalisée

Constantes de dépôts
plage 0,5-5µm

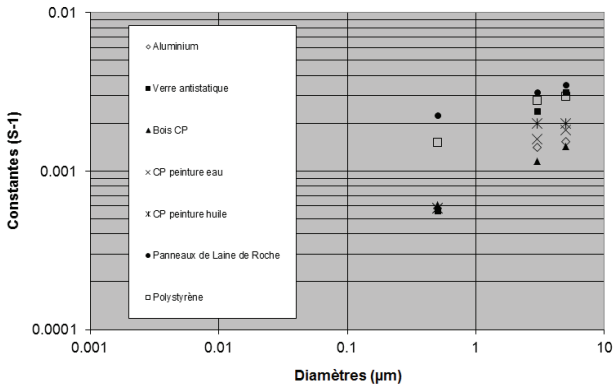


Figure 3. Constantes de dépôt.

L'état surfacique des différents revêtements standards (aussi bien en terme de rugosité qu'en terme de potentiel captant envers les particules, qu'il soit électrostatique ou d'une autre nature) est donc la clé de voûte incontournable pour établir un lien direct entre la constante de dépôt mesurée dans notre dispositif expérimental et la paroi. Ce n'est que la connaissance puis la définition de l'état surfacique d'une paroi qui pourra pour des conditions bien identifiées de l'ambiance (T° , HR, caractéristiques de l'écoulement,...) nous permettre de mieux comprendre le pouvoir captant des revêtements du bâtiment.

Les résultats de la figure 3 précédente révèlent bien que la rugosité ne traduit pas à elle seule le pouvoir captant des parois, ainsi la figure 4 ci-après montre qu'il n'existe pas de critère universel de captation pour les revêtements. Le phénomène

de dépôt peut aussi bien être accentué par la rugosité de la surface (plus le matériau est rugueux plus il se positionne à droite selon l'axe Ra/D), que par les phénomènes électrostatiques liés à la nature diélectrique des matériaux (c'est le cas du verre est très lisse et captant à la fois, ou encore du linoléum, bien que plus lisse que le papier peint, est plus captant du fait de sa nature synthétique). Bien que nous ayons défini un coefficient de captation pour différents revêtements, celui-ci ne fait intervenir aucun paramètre lié aux conditions aux limites de notre domaine d'étude alors que le paramètre principal mesuré au sein du dispositif $\lambda_{\text{dépôt}}$ (s^{-1}) change considérablement selon les conditions aux limites imposées par le revêtement.

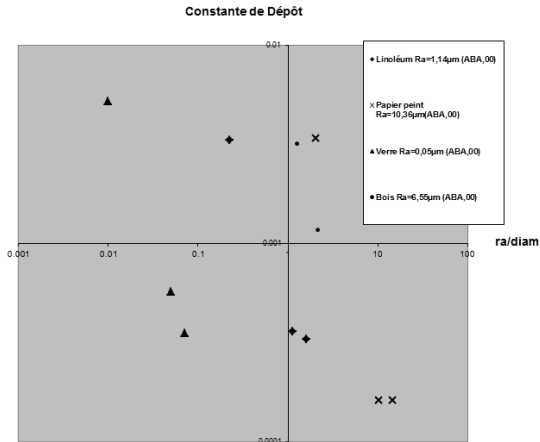


Figure 4. Rugosité et influence électrostatique [13,14]

Lorsque l'on considère des matériaux électrostatiques tels que le verre ou encore le linoléum on remarque qu'ils se positionnent sur la gauche de la figure 4 malgré que le rapport de leur rugosité soit de l'ordre de 22 ($Ra(\text{linoléum}) / Ra(\text{verre}) = 22,80$) alors que pour des matériaux considérés moins électrostatiques tels que le bois et le papier peint, le rapport $Ra(\text{papier}) / Ra(\text{bois}) = 1,50$.

Conclusion. A travers les différentes études que nous avons réalisées au LaSIE, nous avons réussi à élargir nos investigations pour atteindre une évaluation contrôlée des constantes de dépôt concernant divers types de matériaux standard couramment utilisés dans le bâtiment. Cette contribution en conditions homogènes en température et en humidité nous a permis d'appréhender les typologies (matériau électrostatique : verre, linoléum) qui malgré leur faible rugosité, restent très attirantes vis-à-vis des poussières véhiculées par l'air.

En perspective à cette étude il est envisagé de monter un dispositif permettant de faire varier la température et l'humidité relative au sein de l'ambiance ventilée. Ainsi les paramètres exploités seraient la rugosité Ra, le diamètre des particules, le nombre de Reynolds de l'écoulement porteur, la température, et l'humidité relative. D'autres facteurs restent à envisager à moyen terme, et l'on peut penser au moyen

de ventilation, à la présence de mobilier, ou bien encore à des caractéristiques géométriques du domaine étudié (rapport de forme ou rapport volume/surface).

BIBLIOGRAPHIE

1. MONN, C. and Junker, M. *Indoor/Outdoor Ratios, Deposition and Resuspension of Fine and Coarse Particles* 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 1999.
2. LANGE C. *Indoor Deposition and the Protective Effect of Houses against Airborne Pollution*. Ph.D Thesis (Riso National Laboratory), Denmark, Mai 1995.
3. NAZAROFF W.W., Gadgil A.J. and Weschler C.J. *Critique of the use of Deposition Velocity in Modelling Indoor Air Quality*, Modelling of Indoor Air Quality and Exposure, ASTM STP 1205, Niren L. Nadga, Ed., American Society for Testing and Material, Philadelphia, pp 81-104, 1993.
4. OFFERMANN, F.J., Sextro, R.G., Fisk, W.J., Grimsrud, D.T., Nazaroff, W.W., Nero, A.V., Revzan, K.L. and Yater J. *Control of Respirable Particles in Indoor Air with Portable Air Cleaners*. Atmospheric Environment, Vol. 19, n° 11, pp. 1761-1771, 1985.
5. THATCHER, T.L. and Layton, D.W. *Deposition, Resuspension and Penetration of Particles within a Residence*. Atmospheric Environment, Vol. 29, pp. 1487-1497, 1995.
6. THATCHER, T.L., Fairchild, W.A. and Nazaroff, W.W. *Particle Deposition from Natural Convection Enclosure Flow Onto Smooth Surfaces*. Aerosol Science and Technology, Vol. 25, pp. 359-374, 1996.
7. ROED, J. and Cannell, R.J. *The Deposition of Beryllium - 7 Marked Particles on Surfaces in Unfurnished and Furnished Rooms*. Proceedings of CEC/OECD Workshop on Recent Advances in Reactor Accident Consequence Assessment (Rome), 1988.
8. BYRNE M.A., An Experimental Study of the Deposition of Aerosol on Indoor Surfaces. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy of the College of London 1995
9. ADAM N. « *Deposition of aerosol particles in ventilation ducts* ». Proceeding of Clima 2000, the 9th International Conference on Heating, Ventilating and Air Conditioning, London, 1993.
10. NAZAROFF, W.W. et G.R. Cass *Mass transport aspect of pollutant removal at indoor surfaces*, Environment International, 15, 1989.
11. OKUYANNA, K., Kousaka, Y., Yamamoto, S. and Hosokaya, T. *Particle Loss of Aerosols with Particle Diameters between 6 and 2000 nm in a Stirred Tank* Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 110, pp. 214-223, 1986.
12. HOLUB, R.F., Raes F., Van Dingenen, R. and Vanmarcke, H. *Deposition of Aerosols and Unattached Radon Daughters in Different Chambers : Theory and Experiment*. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 24, pp. 217-220, 1988.
13. M. Abadie. « *Contribution à l'étude de la pollution particulaire : rôle des parois, rôle de la ventilation* ». Thèse Université de La Rochelle, 2000.
14. K. Limam « *Transferts de particules dans les ambiances ventilées*» HDR Université de la Rochelle, le 21 Juin 2004.