

## **Contribution à l'étude expérimentale et numérique de la remise en suspension des particules par l'activité humaine**

**J. El Hijri**

Laboratoire d'Energétique, Equipe des Transferts Thermiques et Energétique (ETTE) – FST, B.P. 416  
Tanger, Maroc, [elhijri-jawad@netcourrier.com](mailto:elhijri-jawad@netcourrier.com),

**A. Draoui**

Laboratoire d'Energétique, Equipe des Transferts Thermiques et Energétique (ETTE) – FST, B.P. 416  
Tanger, Maroc, [a.draoui@fstt.ac.ma](mailto:a.draoui@fstt.ac.ma)

**K. Limam**

LEPTIAB, Pôle Sciences et Technologie, Av. Michel Crépeau, 17042 La Rochelle CEDEX 1, France,  
[klimam01@univ-lr.fr](mailto:klimam01@univ-lr.fr)

### **Résumé**

Concernant les pollutions particulières des ambiances, qu'elles soient habitables ou destinées à accueillir des populations, c'est essentiellement l'étude du dépôt des particules ou de leur migration dans l'air, qui a le plus souvent été traitée dans la bibliographie. Pour l'instant trop peu d'études ont été consacrées aux aspects de la remise en suspension des particules car de façon générale, qu'il s'agisse d'habitations ou de grands volumes ouverts au public, les vitesses de l'air restent relativement faibles et permettent difficilement d'«arracher» les particules déposées. C'est dans cet esprit que nous avons élaboré en cellule test, un protocole expérimental pour mettre en évidence ce phénomène. Nos expérimentations permettront de dégager une tendance visant la modélisation du comportement particulaire en phase de remise en suspension. Nous nous sommes basés sur l'analogie électrique des cycles de charge – décharge d'un self dans une résistance dans un circuit RL pour modéliser le dépôt et la remise en suspension des particules. Les résultats fournis par le modèle reproduisent dans la majorité des cas les résultats expérimentaux sur des intervalles représentatifs de temps.

**Mots clés** : Pollution ; particules ; dépôt ; remise en suspension ; revêtement du plancher.

### **Abstract**

Particles pollutions inside buildings which are designated for living or to welcome peoples is a very important subject treated in bibliography for its parameters such as particles settling and airborne transport. Nowadays there is a lack of studies developed in the frame of particles suspension in air, as the air speed in big volume rooms is low and so more difficult take off the settled particles. Therefore we have developed a testing room to measure this phenomenon. Our experiments showed out an approach to modelling particles behaviour during the resuspension phenomenon. We based ourselves on the electric analogy of the cycles of load - discharge of a self-service in a resistance in a circuit RL to model the deposit and the handing-over in suspension of the particles. The results provided by the model reproduce in the majority of the cases the experimental results on intervals representative of time.

**Key words**: Pollution; particle; deposition; resuspension; floor materials.

## **1. INTRODUCTION**

La pollution de l'air peut être définie comme la présence de gaz et/ou de particules dans une atmosphère extérieure ou intérieure et dans des concentrations telles que les effets sur la santé et les impacts sur l'environnement soient avérés.

Depuis quelques années, la Qualité de l'Air Intérieur (QAI) s'impose comme un sujet qui préoccupe de plus en plus les citoyens, les politiques et les gouvernements. Cet intérêt récent provient de la simple constatation que les citoyens passent en moyenne 80% de leurs temps à l'intérieur de lieux clos (habitat, lieu de travail, transport,...). En effet, pour de nombreuses espèces polluantes, la qualité de l'air est plus pauvre à l'intérieur qu'à l'extérieur des bâtiments. Cette situation a même tendance à s'aggraver ces dernières années avec l'augmentation de l'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment et la réduction des débits de ventilation imposées dans l'unique objectif d'économies d'énergie. L'environnement intérieur d'un bâtiment constitue un milieu complexe caractérisé par de nombreux paramètres qui peuvent avoir un impact sur la santé et le confort des occupants. Il existe de multiples interactions entre le bâtiment, son utilisation et les personnes qui y vivent ou y travaillent. C'est aussi un environnement dynamique caractérisé par une grande variabilité des sources de pollution, par des types d'espaces intérieurs différents, et par des conditions de « climat intérieur » et de ventilation également diverses. Les pollutions extérieure et intérieure peuvent ainsi s'ajouter, mais aussi interagir, en créant d'autres polluants tels certains composés organiques volatils, très présents dans les habitations. Concernant la pollution intérieure, les principales sources de contaminations sont les occupants eux-mêmes et leurs activités, les matériaux de construction (revêtement des murs, peintures, matériaux d'isolation...), ainsi que les équipements du bâtiment (appareils ménagers, systèmes de ventilation et d'air conditionné...). De grandes quantités de travaux de recherches ont démarré dans le but d'étudier et quantifier les particules et leur dépôt sur les parois verticales, sol et plafonds ([1-3]). Des études de la remise en suspension des particules radioactives, des sédiments sous marins, etc. faisaient l'objet de certaines recherches approfondies. Or, l'étude de la remise en suspension des particules dans l'habitat par les pas ou autre cause, reste un domaine « quasi-vide », du fait que les activités dans l'habitat restent généralement calmes et du fait de l'absence de fort courant d'air capable d'arracher les particules de leur adhérence.

L'article de Karlsson E. [4], décrit brièvement une expérience et quelques résultats de remise en suspension dans une pièce. Les résultats montrent également que la remise en suspension est un phénomène important et que le taux de remise en suspension doit être donné en fonction de la taille de l'aérosol, de l'activité humaine et du revêtement de sol. Plus récemment, les travaux de Fortain A. [5], ont concerné la caractérisation de la pollution particulaire dans les gares souterraines soumises d'une part au trafic des trains mais également à la remise en suspension de particules (initialement au sol) par les voyageurs marchant le long des quais. Cette étude a montré que suivant les tailles de particules, on peut remarquer que les concentrations varient d'un facteur 2 à 10 autour du pic dû aux passages des voyageurs sur le quai pendant les heures de trafic. Au vu du nombre très limité de travaux ayant été réalisés sur la remise en suspension de poussière par l'activité humaine au sein des ambiances ventilées, les connaissances sur les phénomènes en jeu restent au jour d'aujourd'hui partielle, voire inexistante [8].

La présente étude vise l'évaluation globale de la remise en suspension de particules issues du plancher (activité humaine par simple déplacement) tout en maîtrisant les conditions aux limites imposées en cellules test mais également de la source mobile qui alimente l'ambiance en polluant. Dans un premier temps, nous avons développé un protocole expérimental basé sur les études précédemment menées au LEPTIAB ([1], [2], [7]) afin de mettre en évidence l'ampleur de la remise en suspension au sein d'une ambiance ventilée. Nos expérimentations nous ont permis d'identifier les différentes tailles de particules susceptibles à être remises en suspension dans les conditions habituelles des activités humaines. Puis, dans une seconde partie, un modèle différent du modèle classique de Nazaroff et al. [6] a été mise en place (modèle par analogie électrique) et nous a permis d'apporter un calcul prédictif de la remise en suspension que nous comparons à nos valeurs mesurées en cellule Test.

## 2. MODELISATION GLOBALE CLASSIQUE

La concentration particulaire de l'air intérieur dépend de plusieurs paramètres. En effet, l'échange avec l'air extérieur (caractérisé généralement par le taux de renouvellement d'air), la présence d'une source interne de polluants particulaires et les interactions avec les parois (phénomènes de dépôt, de ricochet ou bien de remise en suspension) influencent énormément la concentration en particules dans l'ambiance intérieure [1, 2]. La figure 1 illustre les différents échanges particulaires à l'intérieur d'une enceinte.

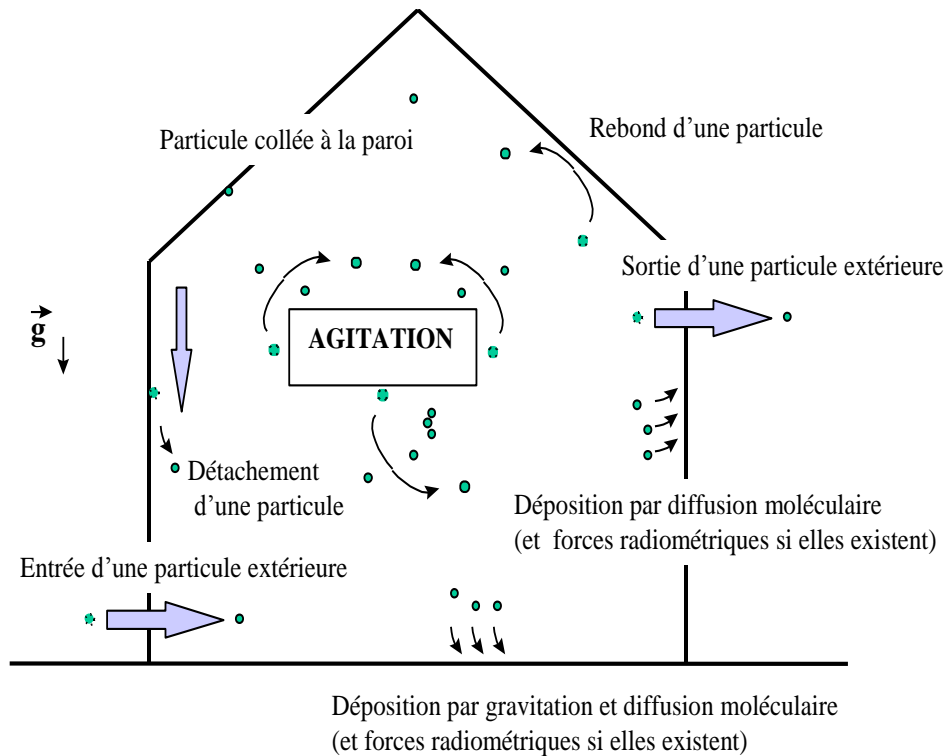


Figure 1 : Mouvement des particules dans une enceinte

Le bilan de conservation massique du polluant particulaire dans une enceinte mono zone peut être exprimé par la relation suivante [6] :

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

avec :

- $C_i$  : concentration intérieure (kg ou nombre par  $m^3$ ),
- $C_{ext}$  : concentration extérieure (kg ou nombre par  $m^3$ ),
- $C_{Di}$  : concentration en particules déposées (kg ou nombre par  $m^3$ )
- $S_i$  : source interne de particules (kg ou nombre par  $m^3$  par seconde)
- $\lambda_r$  : coefficient de renouvellement d'air ( $s^{-1}$ ),
- $fp$  : fraction pénétrante,
- $\lambda_{de}$  : paramètre de dépôt ( $s^{-1}$ ),

$\lambda_R$ : paramètre de remise en suspension ( $s^{-1}$ )

L'approche globale consiste à modéliser le comportement de l'ensemble des particules en considérant que celles-ci sont uniformément réparties dans le volume d'étude. On s'intéresse alors au comportement global de l'ensemble des particules de l'ambiance. Contrairement aux approches fines qui consistent à déterminer les trajectoires de chaque particule en tant qu'entité unique et donc sont couplées aux équations de mouvement particulaire. Par conséquent, l'approche globale ne se base que sur un bilan massique.

### 3. MODELISATION PAR ANALOGIE ELECTRIQUE

Le comportement d'une bobine dans un circuit peut permettre de réguler l'intensité du courant en contrôlant la croissance du courant dans les différents dispositifs d'électronique de puissance.

Cette capacité de « retenir » ou d'injecter les électrons dans un circuit électrique nous a amené à considérer la possibilité d'assimiler les cycles de charge/décharge de ce composant électronique aux phases de dépôt particulaire et de remise en suspension.

Nous avons alors établi notre modèle en assimilant le comportement particulaire à la caractéristique d'une bobine dans un circuit RL selon le tableau suivant :

Grandeurs particulaires	Grandeurs électriques
Concentration $c(t)$	Intensité du courant $i(t)$
Coefficient du dépôt $\lambda_d$	$1/\tau$
$C_0$	$E/R$
Dépôt	Régime forcé
Remise en suspension	Régime libre

**Tableau 1** : Analogie entre les paramètres particulaires et les paramètres électriques.

En posant les équations (2) et (3) ci-dessous, nous cherchons à vérifier si le comportement du transfert (charge et décharge) d'un contaminant par le vecteur air est similaire au comportement d'une bobine dans un circuit RL, vis-à-vis du courant électrique. Le terme A étant l'inverse de la constante de temps du circuit RL, le dépôt présentera une allure décroissance (dépollution de l'air(2)) et la remise en suspension présentera une allure croissante (pollution en augmentation dans l'air (3) de façon analogue à l'augmentation d'un courant électrique dans un circuit):

$$C(t) = f(\Phi) \frac{E}{R} e^{(A.t)} \quad (2)$$

$$C(t) = f(\Phi) \frac{E}{R} (1 - e^{(A.t)}) \quad (3)$$

Il faut noter d'une part que  $f$  est une fonction du diamètre de la particule et du revêtement utilisé, et que d'autre part, selon le revêtement utilisé, la fonction  $f$  peut être soit une fonction de puissance, soit un polynôme de second degré. Nous ajoutons également que l'analogie électrique est conforme à l'approche globale dans le sens où, tout « apport » d'électrons fait modifier « globalement » le courant. Les limites de cette approche résident sur un point lié à l'homogénéité de la concentration particulaire dans l'espace. En effet la remise en suspension restant un phénomène « local » celle-ci est source d'hétérogénéité et donc se situe aux limites de l'application du modèle global de Nazaroff [6]

se basant sur une bonne homogénéité des concentrations particulaires dans l'ambiance. L'intérêt de notre modélisation est de voir à quel niveau l'approche « globale » peut être appliquée au phénomène « local » de remise en suspension. Le paragraphe 5 permettra de situer la qualité de la prédiction.

#### 4. DISPOSITIF ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Les expérimentations ont été opérées dans la cellule test du LEPTIAB ([7] [9] [10], voir figure 2) avec différents revêtement de sol (bois, linoléum lisse, linoléum antidérapant et moquette) dont nous avons préalablement étudié la rugosité par des techniques bien connues, [10].



Figure 2.a: Cellule test du LEPTAB

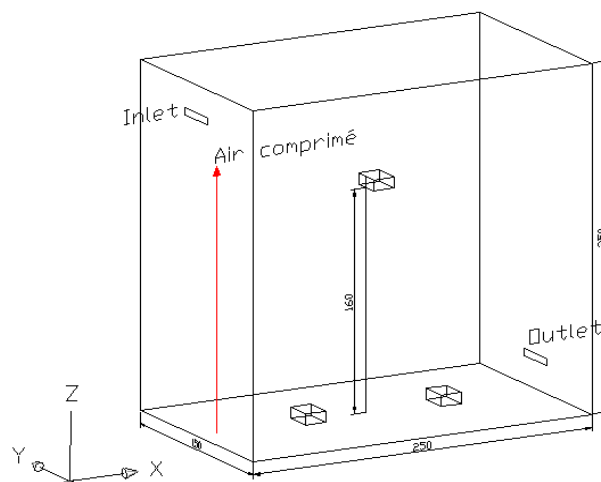


Figure 2.b : Schéma de la cellule Test (emplacement des compteurs de particules, de l'injection de l'air comprimé, ainsi que du soufflage et de l'extraction).

Nous avons développé et mis en place un protocole expérimental basé sur une cellule test de volume relativement faible ([10] où une cellule Test en bois a été utilisée, figure 2.a). Ainsi nos expériences se sont déroulées dans une cellule test ( $2.5 \times 1.5 \times 2.5 \text{ m}^3$ ) avec une installation de VMC à débit réglable et un soufflage d'air comprimé filtré.

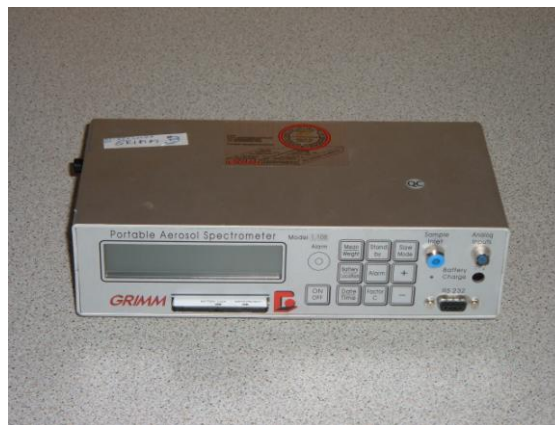
Le revêtement à étudier est installé sur le plancher de la cellule test, puis les 3 compteurs de particules Grimm® (modèle 1.108) sont placés selon la disposition montrée dans la figure 2.b (deux au sol et un surélevé). Les particules sont injectées dans la cellule à l'aide d'un générateur d'aérosol TOPAS® SAG 410, et neutralisées de leurs charges électrostatiques par une *neutraliseur* TOPAS® EAN 581.



**Figure 3.a :** Neutralisateur de particules TOPAS EAN 581



**Figure 3.b :** Disperseur de particules TOPAS SAG 410



**Figure 3.c :** Compteur optique de particules GRIMM 1.108

Les différentes figures 3.a, b, c illustrent les équipements majeurs utilisés lors des différentes expérimentations dédiées dans l'ordre à : la neutralisation, la génération puis le comptage des particules injectées dans l'ambiance. L'homogénéisation de la pollution se fait par brassage, assuré par un ventilateur plafonnier.

Afin « d'assainir » au maximum les résultats pour pouvoir mettre en évidence l'ampleur de la remise en suspension. En plus de la VMC, le soufflage direct d'air comprimé filtré à l'intérieure de la cellule contribue au nettoyage de l'air intérieur et oblige les particules à se déposer sur le plancher et les parois (comme le montre la figure 2.b). Une fois les particules déposées, on arrête la VMC et l'air comprimé pour permettre à un témoin humain (toujours le même) de marcher dans la cellule pendant une durée de 5 min, selon un marquage et une cadence déterminés scrupuleusement respectés.

## 5. LES RESULTATS

Pour ne pas alourdir le présente article, nous avons choisi de présenter uniquement les résultats relatifs au revêtement en bois durant les différentes phases du comportement particulaire (dépôt et remise en suspension).

### **le revêtement de sol sollicité**

Ainsi en ce qui concerne la cartographie 3D du revêtement bois (plancher, en contact direct avec l'air ambiant et les sollicitations physiques apportées par la personne sujette à se déplacer en marchant) nous proposons la figure 4.a pour apprécier le relief qui a été scruté. La figure 4.b illustre l'impact d'un pas sur le plancher.

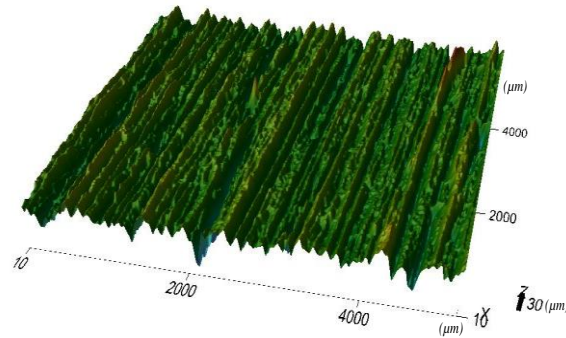


Figure 4.a : Cartographie du revêtement bois du sol

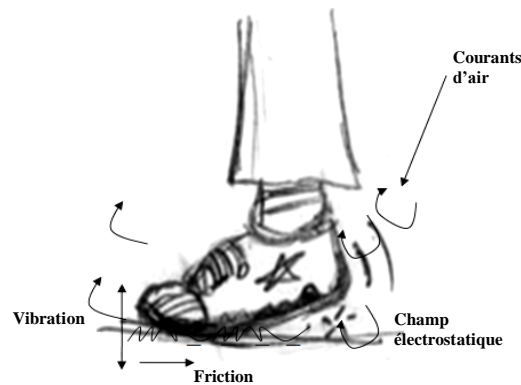


Figure 4.b : Remise en suspension par les pas humains

### La remise en suspension

D'après les figures 5 et 6, on peut remarquer que les résultats numériques obtenus par notre modèle de l'analogie électrique coïncident avec les résultats expérimentaux (erreur relative  $< 10\%$ ). Ce constat nous permet d'affirmer que notre modèle global donne des résultats assez fiables concernant le comportement particulaire en cellule fermée ventilée. Cependant on peut clairement constater sur la figure 7, que les résultats numériques obtenus par notre modèle de l'analogie électrique présentent une petite discontinuité lors du passage du dépôt à la remise en suspension.

Cette discontinuité est due au fait que le modèle ne prend pas en compte le facteur de l'activité humaine de façon explicite. Aussi, la transition entre les deux phénomènes est considérée de façon discrète.

Nous constatons également que lorsqu'il existe une dispersion plus importante (concernant les mesures et c'est le cas pour les particules les plus fines [10]) le modèle présente plus d'écarts notamment sur le phénomène de décharge, la remise en suspension présentant une prédiction plus fiable.



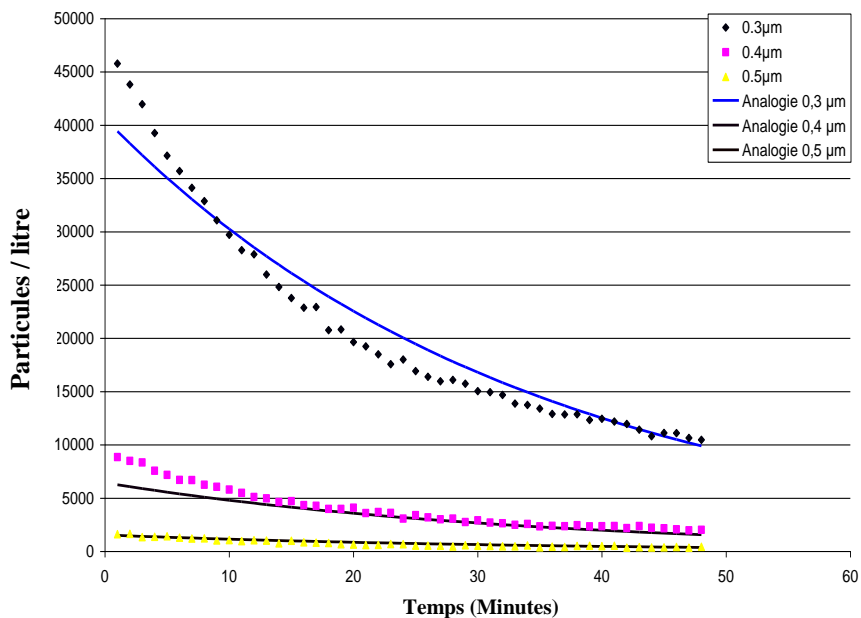


Figure 5 : Superposition des résultats expérimentaux / numériques (dépôt)

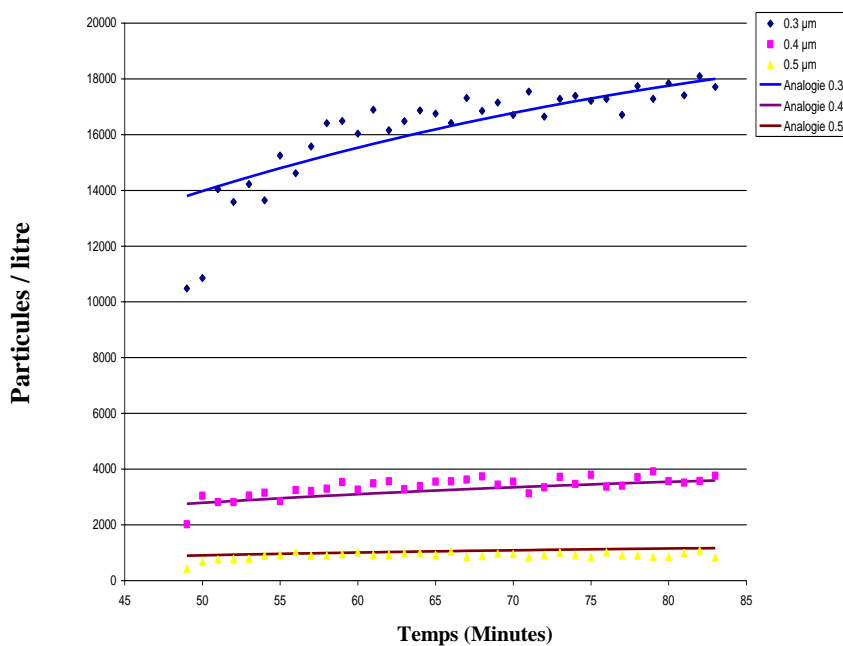


Figure 6 : Superposition des résultats expérimentaux / numériques (remise en suspension)

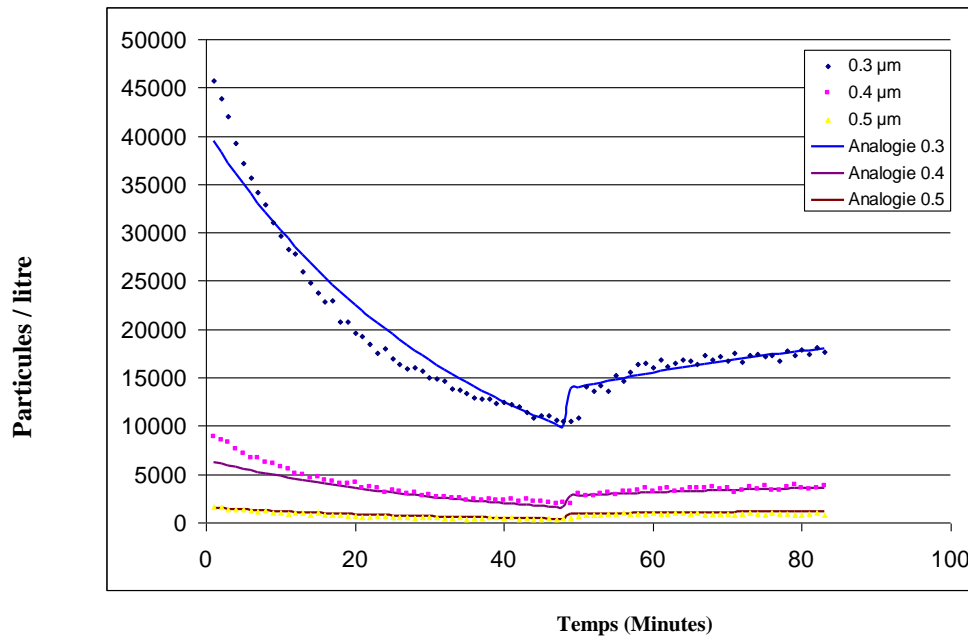


Figure 7 : Superposition des résultats numériques par analogie électrique

## 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude nous a permis d'accroître les connaissances sur le comportement des particules notamment en aval de leur dépôt sur les surfaces intérieures du bâtiment. Cependant, de nombreux paramètres entrant en jeu restent méconnus pour pouvoir modéliser de manière réaliste le comportement des particules. Ces paramètres peuvent être liés soit aux particules, soit aux surfaces de dépôt.

La perspective d'étudier d'une manière plus avancée l'influence de la dureté des matériaux sur la remise en suspension reste une voie intéressante.

Le modèle que nous avons développé pourrait être amélioré pour tenir en compte les différentes forces causant la remise en suspension (forces mécaniques (vibrations), électrostatiques, aérodynamique, [10]).

## 7. REFERENCES

1. Abadie M. « Contribution à l'étude de la pollution particulaire : rôle des parois, rôle de la ventilation » Thèse Université de La Rochelle, Leptab, Septembre 2000.
2. Limam K. « Transfert de Particules dans les ambiances ventilés » HDR, Université de La Rochelle, Leptab, Juin 2004.
3. Limam K. « Programme Interministériel pour une Meilleure Qualité de l'air à l'échelle locale et urbaine. Caractérisation physico-chimique et étude du transport des particules à l'intérieur des locaux », Projet National PRIMEQUAL2-MEDD- 2002/2007.
4. Karlsson E.; Fauml ngmark I.; Berglund T. "resuspension of an indoor aerosol", Journal of Aerosol Science, Volume 27, Supplement 1, September 1996 , pp. 441-442(2)

5. Fortain A. « Caractérisation des particules en gares souterraines », Thèse Université de La Rochelle, Leptab, Juin 2008.
6. Nazaroff W. W., Cass G. R. « Particle deposition from a natural convection flow onto a vertical isothermal flat plate », *Journal of Aerosol Science* 20, pp. 138-139, 1989.
7. Bouilly J. « Etude de l'impact de la pollution particulaire sur la qualité de l'air intérieur en site urbain » Thèse Université de La Rochelle, Leptab, Décembre 2003.
8. Gomes C. A. A., Hu B., Freihaut J. D. « Resuspension of allergen-containing particles under mechanical and aerodynamic forces from human walking. Introduction to an experimental methodology », Indoor Environment Center, Architectural department, University Park, PA 16802, USA, 2006.
9. El Hijri J., Draoui A., Limam K. « Etude expérimentale de la remise en suspension des particules. Comparaison entre des revêtements lisses et rugueux », 8ème Congrès de Mécanique, 17 – 20 Avril, El Jadida - Maroc, Volume II, pp. 346-348, 2007.
10. El Hijri J. « Contribution expérimentale et numérique à l'étude de la remise en suspension des particules par l'activité humaine », Thèse en cotutelle : Université de La Rochelle (Leptab) et Faculté des Sciences et Techniques de Tanger (Maroc), Décembre 2008.