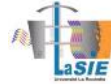


UDC 624

EVALUATION DE L'IMPACTE DE LA VENTILATION SUR LA QUALITÉ PARTICULAIRE D'UNE AMBIANCE : EXPOSITION DES PERSONNES SELON LA ZONE



Limam K. ^{a}, Olea Popescu L. ^b, Abadie M. ^a,
Savytskyi M.V. ^c Ozhyshchenko O. ^c*



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

^bDepartment of Thermodynamics and Mass transfer, Technical University of Construction of Bucharest, Romania

^cAcademy of Civil Engineering and Architecture”, Dnipropetrovsk (Ukraine)

Introduction. La pollution particulaire de l'air résulte aujourd'hui essentiellement de l'activité humaine sous toutes ses formes (trafic automobile, production industrielle,...). F.Wickham [1] et D.S. Etkin [2] montrent que les particules <10µm peuvent être dangereuses pour le système respiratoire humain. Les parois et obstacles intérieurs du bâtiment se comportent comme de véritables pièges à particules. Dans la bibliographie, deux niveaux de modélisation existent :

- l'approche globale, où cette fois-ci c'est l'ensemble des particules (supposées uniformément réparties dans le volume) qui nous intéresse par son comportement global vis à vis de l'ambiance.

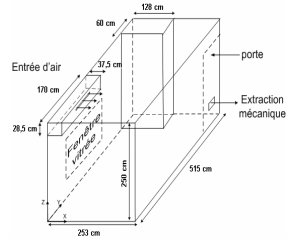
- l'approche fine, où chacune des particules en mouvement sera suivie (par sa trajectoire propre) dans l'écoulement d'air, et la connaissance de ce dernier pouvant se faire par le calcul numérique. Les équations de la dynamique sont alors résolues soit par des méthodes Eulériennes ou Lagrangiennes (J. Bouilly [3]).

La présente communication utilise chacun de ces niveaux de modélisation pour deux ambiances ventilées différentes: une cellule Test au LEPTAB (LaSIE) et une pièce de la maison Maria au CSTB. Ces deux domaines d'études ont été utilisés pour mener des campagnes expérimentales dédiées à évaluer des vitesses de dépôt particulaire. D'une part au sein du LaSIE (LEPTAB), nous disposons de différents outils expérimentaux dédiés à l'évaluation de la dispersion et du dépôt de particules. La cellule Test que nous avons utilisé pour nos expérimentations est présentée en Figure 1a. Cette cellule expérimentale en bois a pour dimensions : 2,5×2,5×1,5 m (volume = 9.375 m³ et surface intérieure = 27.5 m²). La rugosité moyenne du contreplaqué constituant cette cellule est identique à celui étudié dans le premier rapport du LEPTAB. D'autre part, au CSTB cette fois-ci, la cellule Maria été exploitée dans le cadre du programme Primequal (K. Limam et al. [4]). Cette pièce MARIA est ventilée mécaniquement par deux bouches de ventilation qui sont présentées ci-après.

Dispositifs expérimentaux. Les figures 1.a et 1.b montrent respectivement ces deux domaines d'étude utilisés en faisant l'hypothèse que les conditions sont isothermes pour la température (20°) et que les conditions d'humidité relatives sont également constantes et identique (70%).



a)



b)

Figure 1. (a) Cellule Test CT LEPTAB actuellement LaSIE-Université de la Rochelle (b) Géométrie de chambre MARIA CSTB Marne-la-Vallée

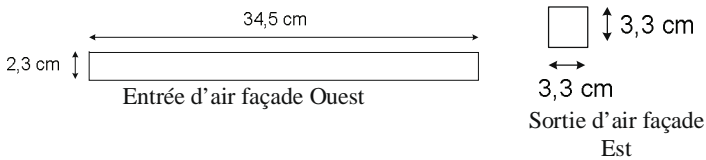


Figure 2. Dimensions des bouches de ventilation

Les deux domaines d'étude (Cellule Test du LaSIE et l'ambiance Maria au CSTB) sont équipées d'un système de soufflage à débit variable.

Nous avons développé et mise en place un protocole expérimental similaire aux deux ambiances. Ainsi nos expériences se sont déroulées dans une cellule test (CT : 2.5 x 1.5 x 2.5 m³) avec une installation de VMC à débit réglable et un soufflage d'air comprimé filtré (H10 : filtre à haute efficacité empêchant l'entrée de toute source extérieure). Après être neutralisées de toute charge électrostatiques, 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. Les particules injectées vont se disperser dans les ambiances grâce au système de ventilation. Quatre GRIMMS sont positionnés : Entrée / Face à l'entrée / Centre / Extraction. Le GRIMM est un compteur laser de particules Grimm[®] (modèle 1.108) va faire un suivi du nombre de particules (selon leur taille entre 0.3 et 20 µm) au sein des ambiances.



a)



b)



c)

Figure 3. a,b,c de gauche à droite: Neutralisateur TOPAS EAN 581, Générateur TOPAS SAG 410, Compteur Laser GRIMM 1.108

Approche globale: la constante de dépôt particulière

Le bilan de conservation massique d'un polluant particulière dans une enceinte monozone, à l'intérieur de laquelle la concentration en particules est considérée uniforme, peut être exprimé par l'équation W.W. Nazaroff [5].

$$\frac{dC_i}{dt} = \lambda_r C_{ext} - \lambda_r C_i - \lambda_d C_i \tag{1}$$

Avec C_i , la concentration intérieure en particules dans l'air (kg ou nombre /m³), C_{ext} , la concentration extérieure en particules dans l'air (kg ou nombre /m³), λ_r , le coefficient de renouvellement d'air (volume/s), λ_d le paramètre de déposition (volume/s).

De nombreuses études ont eu pour but d'évaluer la constante de déposition in situ (F.J. Offermann [6] et N.M. Adam [7]), mais le problème majeur reste que d'une part ces niveaux de déposition sont obtenus pour des configurations spécifiques et d'autre part de nombreux paramètres ne peuvent être pris en compte. C'est pourquoi, des études sur modèles réduits ont été effectuées (K. Okuyanna [8] et M.A. Byrne [9]) afin de maîtriser au mieux les conditions limites du problème (infiltration d'air, température de l'air et des surfaces). Bien que ces études ont permis la détermination de la déposition globale à l'intérieur d'une enceinte ainsi que la localisation du lieu privilégié de déposition; les résultats ne restent limités des tailles spécifiques de particules et à des revêtements essentiellement lisses. Il nous a donc paru intéressant de mettre au point un protocole expérimental suffisamment simple afin de pouvoir déterminer les valeurs de constantes de déposition pour plusieurs tailles de particules et plusieurs revêtements de surfaces rencontrés dans le bâtiment.

Lorsqu'un polluant poly-dispersé est injecté en milieu agité (ventilation) et qu'un prélèvement est positionné au centre du volume (compteur de particule GRIMM), la concentration du polluant obéit à la loi suivante :

$$C_i(t) = C_i(0) \times \exp(-\lambda_d \times t) \tag{2}$$

où λ_g est appelée constante globale de dépôt qui est la somme du taux de renouvellement d'air dans la cellule λ_v et de la constante de dépôt :

$$\lambda_g = \lambda_v + \lambda_d \tag{3}$$

La valeur de la constante de déposition est déterminée par régression linéaire, seules les valeurs obtenues avec un coefficient de corrélation, R^2 , supérieur à 95% ont été retenues.

Approche fine: les trajectoires particulières. Concernant le deuxième niveau de modélisation, nous avons mise au point un code numérique de transport particulière dans un écoulement turbulent en cavité. Cet outil permet de prédire la trajectoire des particules par la prise en compte des différentes forces qui agissent

sur celles-ci (traînée, gravité, poussée); mais également du caractère turbulent de l'écoulement d'air. Dans une première étape, les vitesses et les caractéristiques turbulentes de l'écoulement d'air (Figure 1) sont évaluées par résolution des équations de Navier Stokes (modèle $k - \epsilon$). Puis, dans une deuxième phase la méthode Lagrangienne (M. Abadie [10]) est appliquée aux particules injectées, qui sont alors traitées individuellement en résolvant l'équation (4) du mouvement des particules (J.O. Hinze [11]). Le modèle de A.D. Gosman, et E. Ioannides [12] permet d'obtenir les vitesses instantanées particulières. La majeure partie des propriétés de la phase particulaire est obtenue en faisant la moyenne d'un nombre significatif de particules.

$$\frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = C_d \frac{\pi}{8} \rho d_p^2 |\vec{U} - \vec{U}_p| (\vec{U} - \vec{U}_p) + C_a \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho \left(\frac{d\vec{U}}{dt} - \frac{d\vec{U}_p}{dt} \right) + \vec{F}_e \quad (6)$$

où d_p , ρ_p et U_p sont respectivement le diamètre, la densité et la vitesse instantanée de la particule; ρ et U sont la densité et la vitesse instantanée du fluide; C_d le coefficient de traînée; C_a le coefficient de masse ajouté et F_e représente les forces externes.

Résultats

La figure 4 ci-dessous montre pour des particules de 0.5 μm les profils enregistrés pour l'entrée, face à l'entrée, le centre et la sortie. Nous remarquons très clairement le niveau de pollution interne avant injection, puis la montée en concentration pendant l'injection, puis la décroissance dès l'arrêt de l'injection. Cette décroissance ou « décharge » de l'air en polluant est due d'une part à l'extraction mais également au dépôt des particules contre les parois intérieures de l'ambiance.

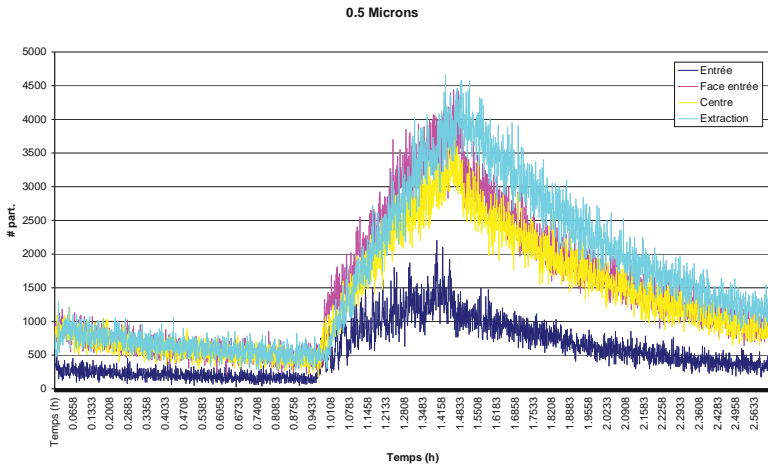


Figure 4. Evolution du nombre de particules dans MARIA / CSTB (PIMEQUAL: Olivier RHAMALO, Marne-la-Vallée)

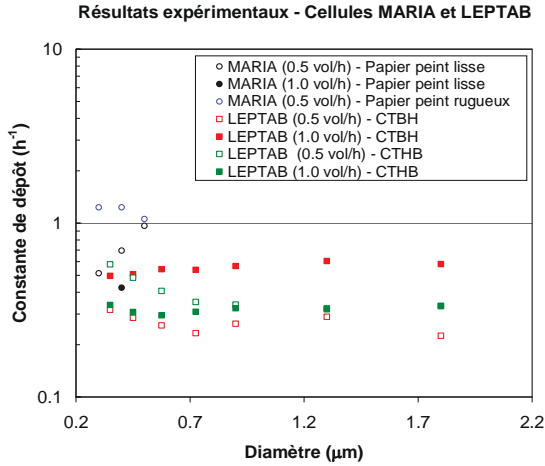


Figure 5. Comparaison (Cellule Test du LEPTAB, Maria du CSTB)

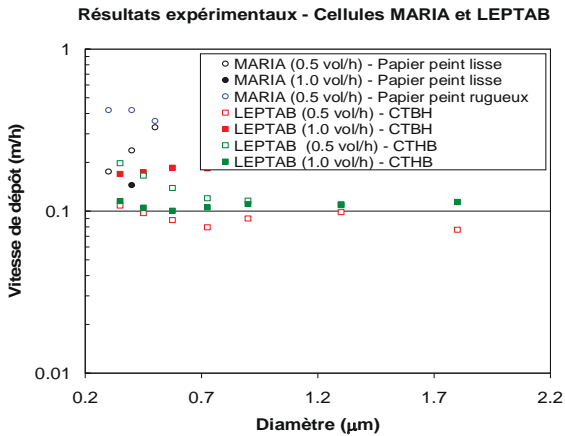


Figure 6 : Comparaison Cellule Test du LEPTAB, Maria du CSTB)

Les Figures 5 et 6 ci-dessus viennent comparer les résultats numériques obtenus pour MARIA et pour la cellule Test. L'ensemble des simulations permet de mettre en évidence la variation de la vitesse de dépôt des particules dans des ambiances du bâtiment. Ainsi les valeurs obtenues varient de 0.04 m/h à 2 m/h. La tendance montre la capacité d'extraction de la ventilation. La simulation CTBH présente des bouches de ventilation (Entrée/Sortie) qui sont dans un même plan, ce qui rend plus efficace l'extraction des particules par rapport à la simulation dans Maria (CSTB) où la sortie n'est pas face à l'entrée. Les résultats de nos simulations montrent l'indépendance de l'efficacité de la ventilation vis-à-vis du taux de renouvellement d'air. Ainsi, contrairement à l'idée reçue, une augmentation de ce taux (de 0.5 à 1 vol/h) n'induit pas une amélioration de l'extraction du polluant particulaire. Ceci confirme les résultats numérique de (J. Bouilly [13]). Ainsi, d'après ces nouveaux résultats, obtenus pour des taux de renouvellement d'air habituellement utilisés dans le bâtiment, la position des bouches de ventilation (Entrée / Sortie) est un facteur essentiel dans l'optimisation de l'extraction du polluant particulaire, encore plus déterminant que le taux de ventilation pour certains cas. La Figure 7 présente une comparaison de tous les résultats expérimentaux et numériques obtenus lors de la dernière phase de ce projet ainsi que des résultats de la littérature. Cette comparaison permet de vérifier que les résultats obtenus ici sont du même ordre de grandeur que les études précédentes sur le sujet. Cependant, les différences de configurations étudiées, la non homogénéité de la concentration en particules dans le volume d'air, mais également la différence de densité entre les différents polluants utilisés (latex, alumine, encens) ; rendent difficiles une analyse plus poussée.

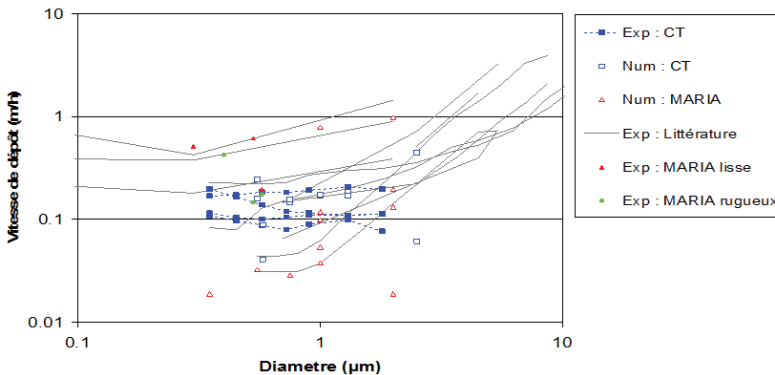


Figure 7. Vitesse de dépôt [LIMAM-PRIMEQUAL-JUIN2007]

La détermination des différentes courbes de décroissance (Figure 37) a permis de déterminer les constantes de dépôt (Figures 38 et 39) et d'en déduire les vitesses de dépôt (Figure 40). Les résultats de nos simulations montrent l'indépendance de l'efficacité de la ventilation vis-à-vis du taux de renouvellement d'air. Ainsi,

contrairement à l'idée reçue, une augmentation de ce taux (de 0.5 à 1vol/h) n'induit pas une amélioration de l'extraction du polluant particulaire. Ceci confirme les résultats numérique de (J. Bouilly [13]). Ainsi, d'après ces nouveaux résultats, obtenus pour des taux de renouvellement d'air habituellement utilisés dans le bâtiment, la position des bouches de ventilation (Entrée / Sortie) est un facteur essentiel dans l'optimisation de l'extraction du polluant particulaire, encore plus déterminant que le taux de ventilation pour certains cas.

La Figure 8 compare les deux zones, en donnant le « pallier » du niveau d'exposition d'une personne située dans l'un ou l'autre sous volume. Nous donnons sur la Figure 8 les évolutions en nombre relatives à 0,35 μ m et 2 μ m. Les particules les plus lourdes dont le nombre diminue plus vite au cours du temps. La zone 2 reste de façon générale plus exposée pour les deux tailles. Les graphes montrent également l'effet de la sédimentation par gravité des particules de 2 μ m qui très vite (en comparaison avec les particules de 0,35 μ m) descendent (en nombre) en dessous des 1500. Les écarts entre la zone 1 et la zone 2 restent faibles mais présente une certaine dissymétrie au niveau des profils tracés.

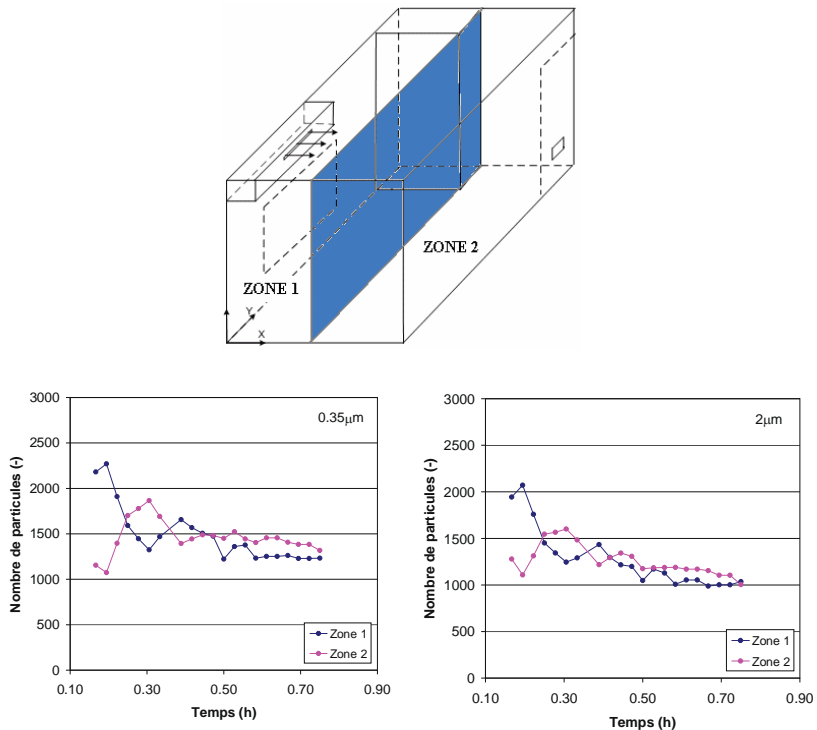


Figure 8 : Position du plan médian, Evolution du nombre de particules dans chaque zone (0,35 et 2 μ m)

La Figure 9 compare les deux zones, en donnant le « pallier » du niveau d'exposition d'une personne située dans l'un ou l'autre sous volume. Nous constatons que la zone 4 est la plus exposée lorsqu'il s'agit d'un polluant de $0,35\mu\text{m}$, à $2\mu\text{m}$ les deux zones semblent avoir un taux d'exposition relativement équivalent puisque leurs profils respectifs restent très voisins.

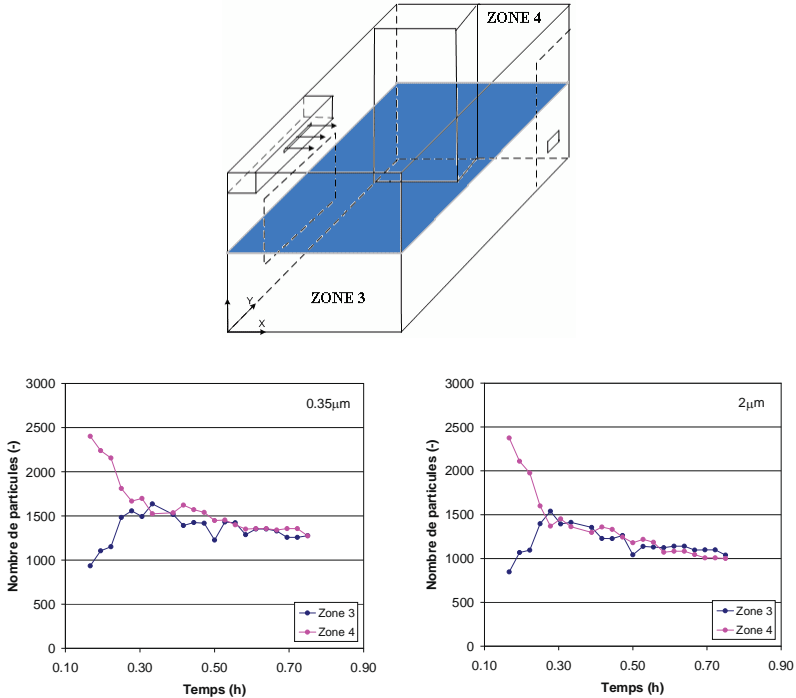


Figure 92 : Position du plan médian, Evolution du nombre de particules dans chaque zone (0,35 et $2\mu\text{m}$)

Les graphes montrent comme précédemment que l'effet de la sédimentation par gravité des particules de $2\mu\text{m}$ est bien prononcé par rapport aux particules fines de $0,35\mu\text{m}$ qui après $\frac{1}{2}$ heure sont en nombre près de 1500. Cependant pour ces deux zones (3 et 4) les écarts sont réduits en comparaison avec les zones (1 et 2) précédentes. Notons également que les profils gagnent en symétrie accusant un gain en homogénéisation présenté ici entre les deux zones (zone 3 et 4).

Les figures 10 sont relatives aux trois dernières zones étudiées (5, 6 et 7). Nous constatons d'une part que bien qu'il y ait une similitude du comportement entre les particules de $0,35$ et de $2\mu\text{m}$, les profils présentent (entre les 3 zones) peu ou pas de symétrie. En effet seul un court pallier juste après $\frac{1}{2}$ heure présente une bonne symétrie de l'évolution des 3 zones. D'autre part, l'évolution des

concentrations en comparaison des zones étudiée accuse ici une forte hétérogénéité dans l'espace et dans le temps montrant que selon l'axe longitudinale les gradients de concentrations sont les plus forts en comparaison avec les autres figures (zones 1 et 2 puis 3 et 4) qui concerne les gradients transversaux puisque l'écoulement transporte le polluant par mouvements circulaires d'axe longitudinale y.

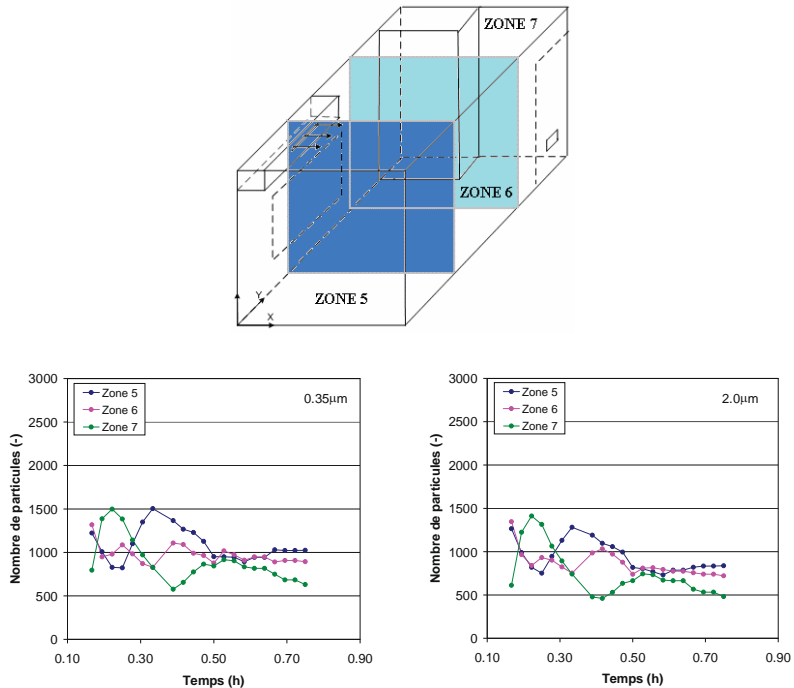


Figure 10. Position du plan médian, Evolution du nombre de particules dans chaque zone (0,35 et 2µm)

Conclusion

L'objectif principal de l'étude numérique de la chambre de la maison MARIA du CSTB était de présenter le potentiel de la simulation numérique pour les problèmes liés au polluant particulaire dans les ambiances intérieures. La présente étude a permis de mieux cerner l'influence de la ventilation sur la pollution particulaire, montrant que le mouvement des particules de l'air intérieur dépend non seulement du taux de renouvellement d'air, du lieu d'injection du polluant (malgré une injection loin du soufflage, le polluant peut être aspiré par le jet du soufflage) mais aussi et essentiellement du chemin emprunté par le flux d'air dans l'ambiance (stratégie de ventilation).

Nous avons montré également que, en plus de la prédiction des concentrations particulaires dans l'air intérieur, il a été possible de déterminer un cloisonnement du

volume étudié pour estimer la décharge de l'air de zones bien délimitées dans lesquelles l'exposition des personnes au polluant a pu être évaluée. Ainsi, grâce à l'étude numérique de la chambre de MARIA, nous avons montré comment il était possible d'arriver à une évaluation des trajectoires et des temps de résidence (injection test de particules par la bouche de soufflage) ou encore des constantes et vitesses de dépôt (injection de particules de façon homogène ou ponctuelle au centre) pour plusieurs tailles de particules. Une approche de l'exposition des personnes a également été réalisée et a montré que l'hétérogénéité de la concentration en particules peut être importante, même pour le cas de salles de taille modeste.

REFERENCES

1. F. Wickham, 1992, Air Filters, Australia, AIRH (No. DA 15)..
2. D.S. Etkin, 1994, Particulates in Indoor Environments: Characterization and Health Effects. Indoor Air Quality Update, Cutter Information Corp.
3. Jerome Bouilly, KarimLimam, Claudine Beghein, FrancisAllard "Effect ofventilation strategies on particle decay rates indoors: An experimental and modeling study" 2005, International Journal of Atmospheric Environment.
4. K. LIMAM et al. « 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.
5. W.W. Nazaroff, A.J. Gadgil and C.J. Weschler, 1993, 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.
6. F.J. Offermann et al., 1985, Control of respirable particles in indoor air with portable air cleaners. Atmospheric Environment, 19, n° 11, 1761-1771.
7. N.M. Adam and S.B. Riffat, 1993, Deposition of aerosol particles in buildings. Proceedings of Clima 2000, the 9th International Conference on Heating, Ventilating and Air Conditioning, London.
8. K. Okuyanna, Y. Kousaka, S. Yamamoto and T. Hosokaya, 1986, Particle loss of aerosols in a stirred tank. Journal of Chemical Engineering of Japan, 10, n°2, 142-147.
9. Byrne M. A., 1995, An Experimental Study of the Deposition of Aerosol on Indoor Surfaces, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy of the University College of London and the Diploma of Imperial College,.
10. M. Abadie, 2000, Contribution à l'étude de la Pollution Particulaire: Rôle des Parois, Rôle de la Ventilation. Thèse de Doctorat, La Rochelle (France) 196p.
11. J.O. Hinze, 1987, Turbulence McGraw-Hill Book Company, Inc., 790p.
12. A.D. Gosman, and E. Ioannides ,1981. Aspects of computer simulation of liquid-fuel combustor. *AIAA 19th Aerospace Science Meeting*. Vol. 81-0323.
13. J. Bouilly, K. Limam, C. Beghein et Q. Chen « Impact de la ventilation sur la dispersion des particules dans une enceinte ». Congrès CIFQ, Thermique des systèmes, Université de Laval, Quebec, Canada, 2003.