

ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DE L'IMPACT DE LA VENTILATION SUR LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR

Limam K. a*, **Olea Popescu L.b**, **Abadie M.a**,
Savytskyi M.V. c, **Iurchenko Iev.L. c**, **Ozhyshchenko O.A.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", 49600
Dnipropetrovsk (Ukraine)*

Introduction. Le but de cette étude est d'évaluer expérimentalement et numériquement l'impact de la ventilation sur la qualité particulière de l'air dans une enceinte. Cette approche consiste donc à évaluer l'effet de différents scénarios de ventilation que l'on rencontre fréquemment dans les bâtiments. Pour cela, nous disposons d'une cellule expérimentale (l'enceinte Test du LaSIE) qui sera également modélisée numériquement. Le principe de la méthode consiste à étudier la décroissance de la concentration particulière en fonction du temps à la suite de l'injection des particules polluantes à l'intérieur de la cellule (pollution interne), ceci pour chaque stratégie de ventilation. Cette décroissance de la concentration particulière permet ainsi de déterminer des constantes globales de dépôt. Plus ces valeurs sont élevées, plus la concentration particulière va diminuer rapidement (soit par dépôt sur les surfaces, soit par extraction). Par conséquent, plus la constante globale de dépôt est élevée, plus l'exposition des occupants à la pollution particulière est limitée. Cette constante constitue donc un bon indicateur de la qualité de l'air particulière d'une ambiance intérieure. Après la description du dispositif expérimental et du principe de mesure, les valeurs de la constante globale de dépôt mesurées dans la cellule Test sont présentées. Dans une seconde partie, la modélisation numérique de cette expérimentation est décrite et les résultats obtenus sont comparés à ceux expérimentaux et à ceux de la littérature.

Dispositif et protocole expérimental. Au sein du LaSIE, 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 1.

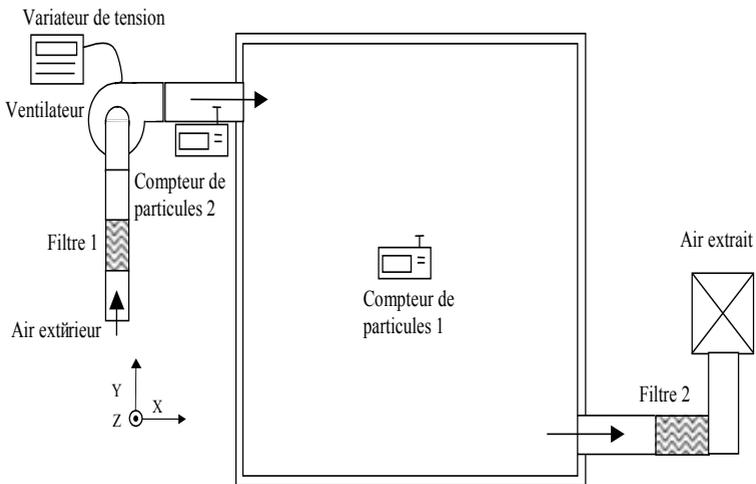


Figure 1. Vue extérieure de l'enceinte, Schéma de principe (le Grimm 1 est placé au cœur de la cellule, le Grimm 2 contrôle l'apport en air neuf, la coupe est selon le plan médian)

Cette cellule expérimentale en bois a pour dimensions : $2,5 \times 2,5 \times 1,5$ m (volume = $9,375$ m³ et surface intérieure = $27,5$ m²). Afin de générer un écoulement ascendant pour assurer l'homogénéité du mélange particulaire dans la cellule Test (pendant l'injection) l'enceinte est équipée d'un agitateur à hélice placé au centre sur le plafond). Un système mécanique lié à la cellule

a été installé enfin d'assurer la ventilation. L'installation a été réalisée selon le schéma présenté sur la Figure 4, et le système se compose d'un filtre à haute efficacité (type H13, 99,95% des particules supérieures à $0,3\mu\text{m}$ sont capturées), un ventilateur relié à un variateur de tension, et un tuyau (de longueur supérieure à 30 fois son diamètre) qui assure la liaison entre la cellule et le ventilateur. La Figure 3 ci-dessous montre le système de ventilation, le générateur Topas 410 de particules, et le compteur GRIMM 1.108 de particules.



Figure 3. Ventilation et Système d'injection et de comptage des polluants.

Pendant nos mesures, deux taux de renouvellement d'air ont été étudiés (0,5 et 1,0 volume/heure) ainsi que deux configurations de ventilation généralement utilisées dans les bâtiments (configuration entrée en bas de la cellule et sortie en haut, et l'inverse : entrée en haut et sortie en bas). Le calibrage du taux de renouvellement d'air imposé a été effectué par la méthode du gaz traceur. Les particules utilisées lors de cette phase expérimentale sont des particules de poudre d'alumine, de diamètre moyen compris entre $0,6\mu\text{m}$ et $0,8\mu\text{m}$ (50 % des particules ont des diamètres inférieurs à cette valeur).

Afin d'évaluer le rôle de la ventilation et sa capacité à évacuer l'air vicié en particules fines, nous avons procédé en deux étapes principales : la première consiste à injecter les particules d'alumine tout en brassant l'air avec le ventilateur plafonnier pour atteindre un niveau appréciable d'homogénéisation du polluant, puis la ventilation traversante est activée et la mesure proprement dite est effectuée. Plus précisément, la procédure suivante a été respectée pour chaque expérience. Avant de démarrer une série de mesures, la cellule est nettoyée avec une soufflette à air comprimé. La constance de la pression d'air comprimé au niveau du Topas, et donc la génération de particules, est assurée pendant toute la durée de l'expérimentation. Après l'injection de particules, l'air est brassé pendant encore 10 minutes. Puis, après la vingtième minute, le brassage est interrompu et le système de ventilation est mis en marche. Selon le taux de renouvellement d'air l'expérience dure de 3 à 6 heures. Pendant chaque mesure la décroissance de la concentration des particules polluantes est mesurée par les compteurs optiques qui ne sont arrêtés que lorsqu'il ne reste qu'environ 10% de la pollution injectée (fin de la mesure). L'évolution typique obtenue pour la concentration en particules est représentée par la Figure 4.

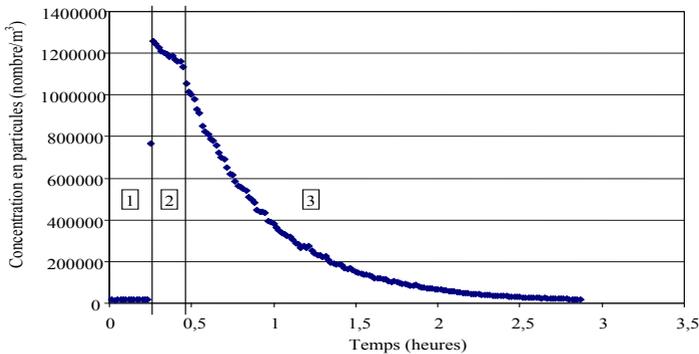


Figure 4. Evolution de la quantité de particules en suspension à l'intérieur de la cellule

Résultats expérimentaux. Selon l'approche globale [NAZ93], l'équation de transport massique des polluants dans un local ventilé mécaniquement s'écrit selon l'équation suivante:

$$\frac{dC_i}{dt} = \underbrace{f\lambda_r C_o}_{\text{I}} - \underbrace{\lambda_r C_i}_{\text{II}} + \underbrace{S_i}_{\text{III}} + \underbrace{\lambda_R D_i}_{\text{IV}} - \underbrace{\lambda_{de} C_i}_{\text{V}} \quad (1)$$

Les différents termes numérotés ci-dessus sont respectivement :

- I le transport des particules de l'extérieur vers l'intérieur par le système de VCM et par infiltration,
- II le transport des particules de l'intérieur vers l'extérieur par le VMC et par exfiltration,
- III le terme source,
- IV la re-suspension des particules déposées,
- V le taux de dépôt sur les surfaces du local.

Dans la présente expérimentation, une fois le polluant injecté, il n'y a plus de sources actives de particules ainsi le terme III vaut zéro. Comme ces particules sont petites la re-suspension est négligée (terme IV est nul). Le transport de particules de l'extérieur vers l'intérieur est empêché par le filtre à haute efficacité, le terme I est alors également négligeable. Ainsi la solution de l'équation qui définit la concentration moyenne au sein de la cellule est de la forme suivante :

$$C_i(t) = C_0 \exp(-\lambda_g t) \quad (2)$$

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 :

$$\lambda_g = \lambda_v + \lambda_d \quad (3)$$

La valeur de la constante globale est déterminée par régression linéaire (seules les valeurs obtenues avec un coefficient de corrélation, R2, supérieur à 96% ont été retenues).

Nous cherchons ici à évaluer l'influence des très faibles vitesses d'écoulement d'air, comme celles rencontrées dans les ambiances intérieures, sur le dépôt des particules. Les nombres de Reynolds associés sont faibles, pour les taux de renouvellement d'air de 0,5 vol/h et 1,0 vol/h, on a :

$$Re_{0,5} = \frac{1}{\nu} v_{inj} d_{inj} = 6,6574 \left(\frac{cm^2}{s} \right)^{-1} * 18,6012 \frac{cm}{s} * 7cm = 866,86 \quad (4)$$

$$Re_{1,0} = 6,6574 * 37,2024 * 7 = 1733,7 \quad (5)$$

où d_{inj} est la hauteur de la bouche d'injection

Ces faibles valeurs du nombre de Reynolds signifient que l'écoulement reste faiblement turbulent, ce qui signifie que les particules auront une tendance assez marquée à suivre l'écoulement d'air.

Les résultats obtenus pour les constantes de dépôt en fonction du diamètre des particules sont présentés dans le Tableau 2. Afin de diminuer l'erreur de nos mesures, chaque essai a été répété au moins 3 fois

Tableau 2 : Constantes obtenues pour les configurations étudiées (Bas-Haut et Haut-Bas) et les deux taux de renouvellement d'air (0,5 et 1 vol/h)

	Bas-Haut		Haut-Bas	
	0,5 vol/h	1 vol/h	0,5 vol/h	1 vol/h
0,3-0,4	0,32	0,50	0,58	0,34
0,4-0,5	0,28	0,51	0,48	0,31
0,5-0,65	0,26	0,54	0,41	0,29
0,65-0,8	0,23	0,54	0,35	0,31
0,8-1,0	0,26	0,57	0,34	0,32
1,0-1,6	0,29	0,60	0,32	0,32
1,6-2,0	0,22	0,58	0,33	0,33

Par la connaissance de la constante de dépôt ($\lambda_{dépôt}$), on peut déterminer la concentration en particules dans l'air d'une enceinte monozone où

les caractéristiques du volume étudié sont alors prises en compte dans la formulation de la « vitesse de dépôt » (équation 6) qui représente globalement la vitesse à laquelle une particule migre vers une des parois avec une certaine probabilité d’y adhérer.

$$V_{dépôt} = \frac{\text{Volume total de la zone}}{\text{Surface intérieure totale}} \times \lambda_{dépôt}$$

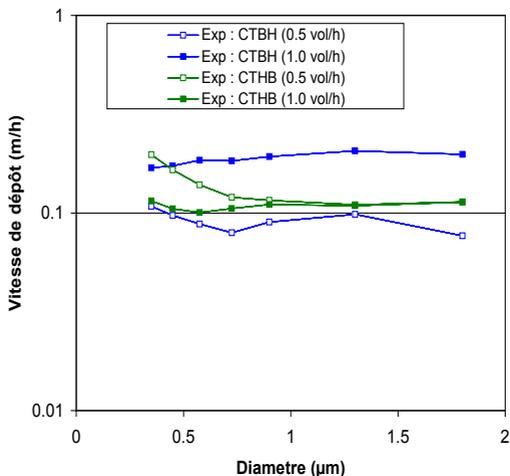


Figure 5. Vitesses de dépôt en fonction du diamètre des particules pour 0,5 et 1 vol/h

La Figure 5 montre l’évolution du dépôt particulaire en fonction de la taille des particules, du taux de renouvellement d’air et de la position des bouches de soufflage et d’extraction. Pour la configuration BH, l’effet d’un doublement du taux de renouvellement d’air se traduit par un doublement de la vitesse de dépôt alors que pour l’autre configuration (HB), si l’augmentation du taux de renouvellement d’air ne modifie pas le dépôt pour les particules d’un diamètre supérieur 0,9 m, son effet est inversé pour les particules plus petites.

Simulations numériques. La détermination de l’écoulement nécessite un maillage très fin dans une grande partie du domaine. Afin de suivre avec précision toute variation des champs massique et aérodynamique, particulièrement dans la région où les gradients sont importants, nous avons adopté un maillage non uniforme, fortement resserré près des parois et des bouches de ventilation. Le maillage utilisé est un maillage structuré (Figure 6), le seul exploitable pour le moment par le code PARDIFF (LaSIE) de dispersion particulaire. Plusieurs tests ont été effectués pour optimiser le maillage au voisinage des parois afin d’utiliser le modèle à bas nombre de Reynolds pour calculer l’écoulement d’air. La valeur de la distance adimensionnée y^+ est inférieure à 1 pour toutes les parois du domaine sauf dans une petite zone au voisinage de l’entrée d’air où elle varie entre 1 et 5. Malgré la taille relativement petite des ouvertures, le resserrissement des

mailles entraîne rapidement une augmentation significative du nombre total de mailles, qui atteint ici $53 \times 61 \times 43 = 139019$ mailles.

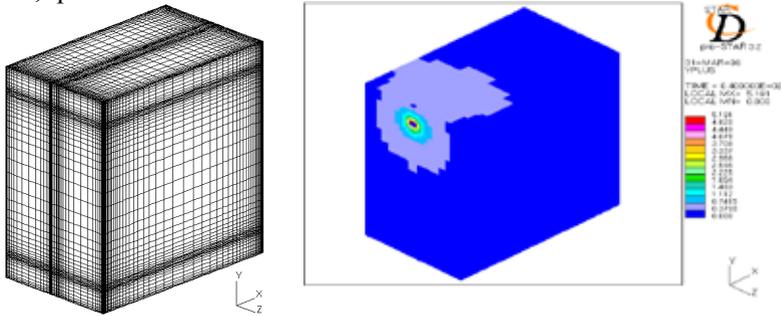


Figure 6. Maillage structuré imposé pour la cellule Test, Valeurs de y^+ obtenus au frontières de la cellule Test (entrée d'air : $7\text{cm} \times 10\text{cm}$)

En entrée, la vitesse d'injection de l'air dans la pièce est calculée de la manière suivante :
$$U = \frac{Q}{S} \quad (7)$$

avec U : la vitesse d'injection (m.s-1),

$Q = V\lambda_r$: l débit d'air (m³.s-1),

λ_r : le taux de renouvellement d'air de la pièce (s-1),

V : le volume de la chambre ventilée (m³), et

S : la surface d'entrée d'air (m²).

La vitesse d'injection est donc égale à $0,19 \text{ m.s}^{-1}$ pour $\lambda_r = 0.5 \text{ vol/h}$
L'énergie cinétique turbulente est déterminée à partir de l'intensité de la turbulence qui est fonction de l'écart type des fluctuations de vitesse.

$$K = \frac{3}{2}(U)^2 \quad (8)$$

L'intensité turbulente a été évaluée à 3 % dans le cas présent.

La caractérisation du taux de dissipation est plus délicate. Nous avons choisi de l'exprimer en fonction de l'énergie cinétique turbulente, et d'une échelle de longueur caractéristique de l'écoulement d'entrée.

$$\tilde{\varepsilon} = C_{\mu}^{3/4} \frac{K^{3/2}}{L} \quad (9)$$

L'échelle de longueur caractéristique de l'écoulement est approximée par la relation suivante : $L = 0.0 d_H$ (10)

où d_H est le diamètre hydraulique de la bouche de ventilation.

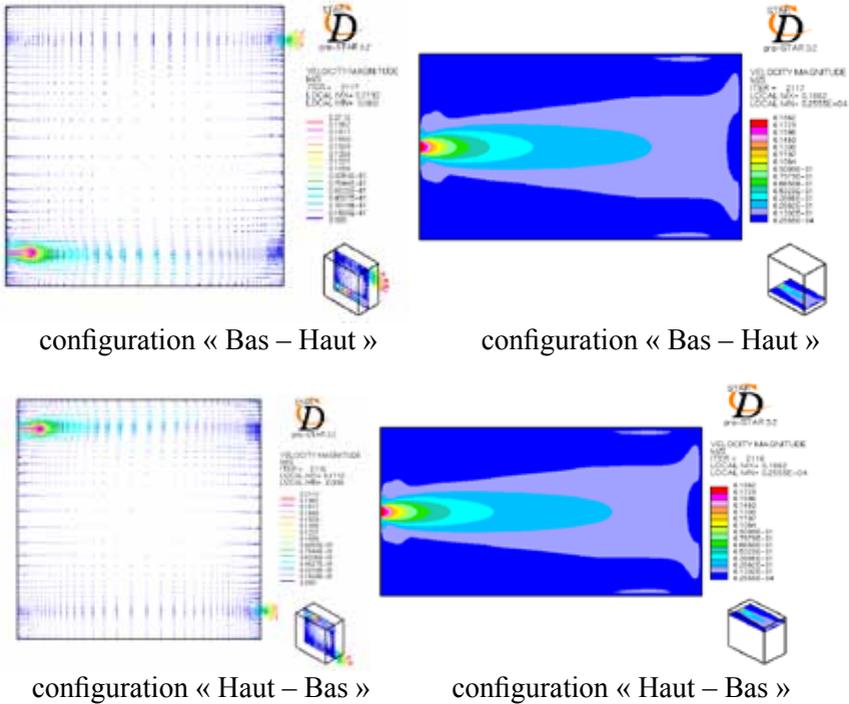


Figure 7 : Ecoulements obtenus pour cellule test, cas 0,5 vol/h

Les parois sont considérées comme imperméables à l'air dont la vitesse est nulle au niveau des parois, et les conditions limites turbulentes sont et .

Le critère de convergence choisi implique que la somme des résidus normalisés dans chaque volume de contrôle et pour chaque variable (vitesses, pression et quantités turbulentes) soit inférieure à . Le schéma de résolution numérique Quick a été utilisé. Dans cette section, sont présentés les champs de vitesse obtenus numériquement pour la cellule Test avec des taux de renouvellement d'air de 0,5 vol/h et 1 vol/h. Comme deux configurations différentes ont été simulées (Bas-Haut et Haut-Bas), les Figures 7 et 8 donnent alors les plans médians passant par les bouches (Figures de gauche pour le plan vertical et à droite pour le plan médian horizontal).

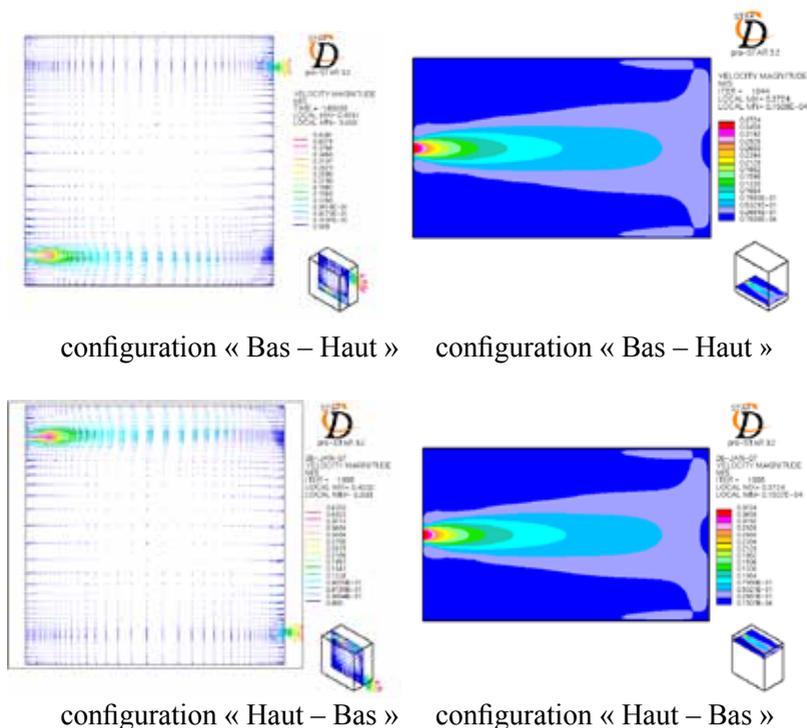


Figure 8 : Ecoulements obtenus pour la cellule test, cas 1,0 vol/h

Qu'il s'agisse de 0,5 ou de 1,0 vol/h, le jet d'air arrive sur le mur en face puis retourne le long des parois latérales. Sur les murs latéraux les zones ayant des vitesses légèrement élevées, sont visibles. Cette forme de l'écoulement est présente pour les deux configurations (Haut-Bas et Bas-Haut) et les différences semblent peu importantes. Lorsque l'on compare le cas 1 vol/h (Figure 8) au cas de 0,5 vol/h (Figure 7), on remarque que les zones de re-circulation près des parois latérales sont plus importantes pour le taux de renouvellement d'air de 1 vol/h. Malgré la vitesse d'injection de 18,6 cm/s (pour 0,5 vol/h), la vitesse dans le reste du domaine est très faible avec un ordre de grandeur de quelque mm/s. Pour 1,0 vol/h, bien que la vitesse d'injection de 37,2 cm/s soit deux fois plus élevée, la vitesse moyenne reste très faible et du même ordre de grandeur que les précédentes (cas 0,5 vol/h). Ce fait provient du développement du jet d'air dont la vitesse moyenne centrale diminue selon l'inverse de la distance à l'entrée de la bouche, ainsi, l'effet d'un doublement de la vitesse d'entrée est rapidement estompé (dans les 20 premiers centimètres). Cependant il faut noter que la turbulence engendrée est plus élevée dans la région proche du jet.

L'objectif de toutes les simulations présentées dans cette section est d'évaluer le dépôt des particules par le biais du calcul de la constante (et vitesse) de dépôt, ceci à partir d'une concentration homogène en particules. Seule la configuration Bas – Haut a été étudiée à cause du temps de calcul élevé nécessaire.

Plus précisément, une série de 6 simulations a eu pour objectif d'évaluer l'importance de la prise en compte de la force brownienne sur le dépôt des particules de diamètres compris entre 0,55 et 1 μm . Le Tableau 3 présente les valeurs de constante de dépôt obtenues pour un taux de renouvellement d'air de 0,5 vol/h. Les résultats montrent clairement que la force brownienne n'influence pas le dépôt des particules de diamètre supérieur à 0,75 μm , cependant l'effet est notable pour les particules de 0,55 μm pour lesquelles le dépôt est augmenté de 50%.

Tableau 3

Constantes de dépôt (h^{-1})

Diamètre (μm)	Avec force brownienne	Sans force brownienne
0,55	0,72	0,47
0,75	0,43	0,46
1,0	0,50	0,51

Comparaison mesure/prédiction et positionnement des résultats dans la bibliographie. La Figure 9 présente une comparaison entre les valeurs de dépôt mesurées et celles calculées grâce à PARDIFF (triangle et rond rouges et vides) et à StarCd (ronds pleins). Tout d'abord, les vitesses de dépôt obtenues par PARDIFF pour 0,5 vol/h surestiment celles mesurées. Ce fait a déjà été observé et a pour origine la surestimation de la turbulence à proximité de la paroi. En effet, le modèle lagrangien utilisé, en considérant l'isotropie de la turbulence, tend à surestimer la composante fluctuante du fluide normal à la paroi, et donc la force du fluide en direction de la paroi. Récemment, [LAI06] a présenté une modification du traitement de la turbulence dans le modèle lagrangien à proximité des parois. Cependant, cette correction repose sur une corrélation empirique non universelle. Notons également que le fait de prendre en compte la force brownienne paraît améliorer la tendance d'augmentation du dépôt observée sur les mesures pour les particules les plus petites.

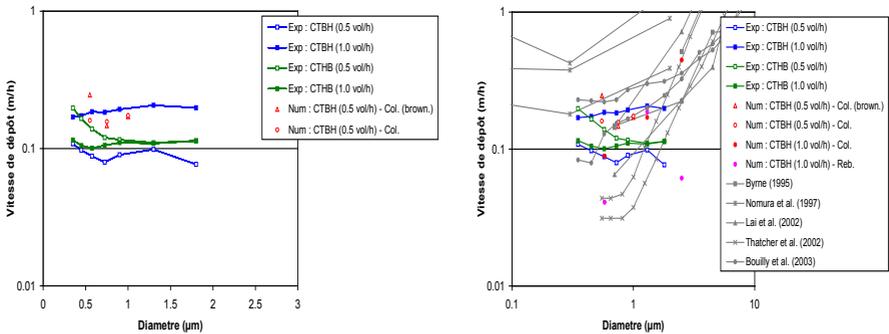


Figure 9a,b. Confrontation Mesures/Calcul en cellule Test

La Figure 9.b vient positionner nos valeurs expérimentales et numériques par rapport à celles rencontrées dans la bibliographie pour des ambiances intérieures. Des résultats concernant des simulations effectuées récemment pour la cellule Test (avec des bouches de ventilation plus larges) ont été ajoutés pour compléter les données. 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 rendent difficiles une analyse plus poussée.

Conclusion. Grâce à notre cellule Test et son équipement, nous avons pu mesurer l'évolution de concentration de particules dans une cellule ventilée mécaniquement et ayant une géométrie très standard dans le bâtiment.

En mesurant l'évolution de la concentration en particules dans une cellule ventilée mécaniquement, 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, mais aussi du chemin emprunté par le flux d'air dans l'ambiance (stratégie de ventilation). Nous avons constaté que l'influence des positions de l'entrée et de la sortie d'air est plus forte pour les particules fines que pour les particules de taille plus importantes, et qu'une augmentation du taux de renouvellement d'air n'implique pas nécessairement un dépôt plus élevé des particules en suspension. Le choix d'une stratégie de ventilation passant par un choix judicieux à la fois du taux de renouvellement d'air mais aussi de la position des entrées et sortie d'air, demeure indispensable afin de limiter la pollution particulaire dans les ambiances habitables.

RÉFÉRENCES

1. [BOU03] BOUILLY J., LIMAM K. BEGHEIN C. et CHEN Q. « Impact de la ventilation sur la dispersion des particules dans une enceinte». Congrès CIFQ 2003 - Québec.
2. [BYR95] BYRNE, M.A., GODDARD, A. J. H., LANGE, C., ROED, J.: Stable Tracer Aerosol Deposition Measurements in a Test Chamber, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 26, No. 4, pp. 645-653, 1995
3. [LAI02] Lai, A.C.K., Byrne, M.A., Goddard, A.J.H.: Experimental Studies of the Effect of Rough Surfaces and Air Speed on Aerosol Deposition in a Test Chamber. *Aerosol Science and Technology* 36 pp. 973-982. 2002
4. [LAI06] Lai, A.C.K.; Chen, F.: Modeling particle deposition and distribution in a chamber with a two-equation Reynolds-averaged Navier-Stokes model, *J. of Aerosol Science*, Vol. 37., No. 12., pp. 1770-1780., 2006.
5. [NAZ93] 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.
6. [NOM97] NOMURA, Y., HOPKE, P.K., FITZGERALD, B. AND MESBAH, B. Deposition of particles in a chamber as a function of ventilation rate, *Aerosol*
7. [THA02] Thatcher T.L., Lai, A. C. K., Moreno-Jackson, R., Sextro, R. G., Nazaroff, W. W.: Effects of room furnishing and air speed on particle deposition rates indoors, *Atmospheric Environment* 36, pp. 1811-1819, 2002.