

COMPARAISON DES CONCENTRATIONS DE 24 h DE SO₂ ET DES FUMÉES NOIRES A L'EXTERIEUR ET A L'INTERIEUR D'UN BATIMENT EN FONCTION DE SON OCCUPATION

M. BENARIE, T. MENARD et A. NONAT

Institut National de Recherche Chimique Appliquée, Centre de Recherche, 91710 Vert-le-Petit, France

(First received 14 May 1973 and in final form 18 July, 1973)

Abstract—Measurements of dark smoke and SO₂ concentration made inside and outside a school showed no significant difference in the case of smoke but SO₂ concentrations indoors were only 71 per cent of those outside. Holiday periods, when the buildings were not occupied, gave similar results to those periods when the pupils (non-smokers) were present.

INTRODUCTION

La majeure partie de la population séjourne plus de temps à l'intérieur des bâtiments qu'à l'extérieur. Il est donc utile de connaître la dépendance entre la concentration de la pollution intérieure et celle existant à l'extérieur. Il importe d'étudier les paramètres de cette dépendance comme la forme, la nature, l'occupation, le mode de chauffage des locaux.

Vu l'intérêt et la complexité du sujet, un nombre assez important de travaux lui ont été consacrés. La plupart de ces recherches sont résumées dans le cadre d'un recueil bibliographique très complet, par Benson, Henderson et Caldwell (1972), contenant 77 références. Nous ne relevons que celles ayant trait plus spécialement au domaine de notre étude, qui est l'influence de l'occupation.

Megaw (1962) a étudié la pénétration de l'iode dans les bâtiments et a trouvé que les concentrations intérieures représentent 20–80 pour cent de celles extérieures et qu'elles sont fonction de la vitesse et de la direction du vent.

Biersteker, de Graaf et Nass (1965) ont étudié la pollution intérieure et extérieure (SO₂ et fumées) sur 800 paires d'observations effectuées dans 60 maisons de Rotterdam. Les résultats sont donnés en fonction de l'année de construction, du mode de chauffage et de l'occupation des locaux par des fumeurs ou des non fumeurs; il s'avère que l'année de construction d'un bâtiment est un paramètre influençant fortement les concentrations intérieures en SO₂:

Dans les bâtiments neufs (construits après 1960)

$$\frac{\text{concentration intérieure}}{\text{concentration extérieure}} \simeq 6 \text{ pour cent en moyenne.}$$

Dans les anciens bâtiments (construits avant 1919)

$$\frac{\text{concentration intérieure}}{\text{concentration extérieure}} \simeq 30 \text{ pour cent en moyenne.}$$

Le mode de chauffage n'a pas une influence significative sur les taux de fumées mais il a une incidence sur le taux de SO_2 . Les concentrations intérieures les plus faibles sont obtenues avec l'utilisation du chauffage central et les plus élevées avec un système de chauffage au gaz.

Sur les 800 paires de valeurs mesurées dans 60 logements, les auteurs ont trouvé que la concentration intérieure en SO_2 est en moyenne égale à 20 pour cent de la concentration extérieure. Parmi les différentes valeurs du rapport ($C_{\text{int.}}/C_{\text{ext.}}$) SO_2 , celle voisine de 20 pour cent donnée par ces auteurs est la plus faible.

Yocom, Clink et Cote (1971) ont effectué une étude sur quatre polluants:

Particules en suspension

Fumées noires

CO

SO_2 .

Pour 3 saisons: été, automne, hiver;

et dans 3 bâtiments différents: Etablissement public, bureau, appartement.

Les mesures de SO_2 observées n'ont pas pu être exploitées car trop faibles et variables.

Les taux des particules en suspension sont fonction de la période de l'année, du type du bâtiment, du conditionnement d'air (qui engendre un taux plus faible). Il est à remarquer que le rapport ($C_{\text{int.}}/C_{\text{ext.}}$) particules diminue de l'été à l'hiver (fermeture progressive des locaux).

Pour les fumées noires, le rapport ($C_{\text{int.}}/C_{\text{ext.}}$) ≈ 1 , avec ou sans conditionnement d'air.

Les résultats trouvés pour l'oxyde de carbone confirment sa nature conservative et sa pénétration presque intégrale dans les structures, soit ($C_{\text{int.}}/C_{\text{ext.}}$) $_{\text{CO}} \approx 1$.

Andersen (1972) a fait des mesures de SO_2 et de fumées pendant 7 mois 1/2 au Danemark et a trouvé que:

$$\left(\frac{C_{\text{int.}}}{C_{\text{ext.}}}\right)_{\text{SO}_2} \approx 51 \text{ pour cent (sur 11 paires de valeurs)}$$

$$\left(\frac{C_{\text{int.}}}{C_{\text{ext.}}}\right)_{\text{FUM}} \approx 69 \text{ pour cent (sur 150 paires de valeurs).}$$

Derouane (1972) a constaté une grande dépendance entre les concentrations intérieures et extérieures des fumées noires lors d'une campagne de mesures de 36 mois en Belgique.

Les taux de fumées à l'intérieur sont de 66 à 87 pour cent des taux extérieurs avec un coefficient de corrélation très élevé.

Jacobs, Manoharan et Goldwater (1962) n'ont trouvé aucune différence significative dans la distribution granulométrique des particules entre l'extérieur et l'intérieur.

Le document E.P.A. (1972) mentionné conclut, entre autres, que l'influence des personnes occupant le bâtiment est encore mal connue. Nous avons voulu clarifier ce dernier point sur un exemple de bâtiment (école) où l'occupation peut être bien définie. L'activité dans ces locaux se trouve également bien précisée (par exemple la qualité de non fumeurs).

PARTIE EXPERIMENTALE

Deux appareils SF mesurant SO_2 et les fumées noires suivant AFNOR NF X-43005 ont été placés à l'intérieur et à l'extérieur d'une école primaire située à Petit Quevilly dans la Seine-Maritime pendant 13 mois, de Mai, 1971 à Mai, 1972 inclus.

Tableau 1. Resultats obtenus pour SO₂ et les fumées noires (Mai, 1971-Mai, 1972)

Périodes	SO ₂							Fumées noires						
	Moy	Intérieur σ	DDL	Moy	Extérieur σ	DDL	I/E	Moy	Intérieur σ	DDL	Moy	Extérieur σ	DDL	I/E
(1) 6 Mai-31 Mai	53,2	29,4	26	71,4	41,9	26	0,745*	25,4	11,5	26	26,1	11,7	26	0,973*
(2) Juin	39,6	14,1	28	57,2	26,8	28	0,692**	19,9	10,0	28	18,9	10,4	28	1,049*
(3) Juillet	V 53,3	18,6	31	61,2	29,5	31	0,871**	23,1	11,3	31	21,9	12,4	31	1,056*
(4) Août	V 58,6	14,9	23	52,0	28,4	23	1,126*	18,3	10,7	23	18,4	9,6	23	0,995*
(5) 1-13 Septembre	V 70,0	26,0	13	75,15	34,3	13	0,919*	27,1	10,6	13	28,7	11,3	13	0,946*
(6) 14-30 Septembre	85,7	31,2	13	122,8	53,1	13	0,698**	52,0	16,9	13	44,0	24,3	13	1,182*
(7) Octobre	98,0	39,8	28	146,2	60,0	28	0,670**	73,0	37,1	28	76,0	38,3	28	0,961*
(8) Novembre, 1971	129,4	84,2	29	195,8	130,7	29	0,662**	64,9	39,4	29	69,0	43,0	29	0,940*
(9) 1-21 Décembre	139,5	67,7	21	204,4	95,5	21	0,682**	78,1	45,1	21	79,6	50,9	21	0,982*
(10) 22 Décembre-2 Janvier	V 74,7	27,3	12	118,2	74,7	12	0,631*	55,1	18,1	12	56,2	23,3	12	0,979*
(11) 3-31 Janvier, 1972	128,5	112,2	29	182,4	147,0	29	0,704*	79,1	50,2	29	84,0	53,8	29	0,941*
(12) 1-11 Février	70,5	34,1	11	122,1	62,0	11	0,578**	65,2	25,9	11	71,3	33,9	11	0,915*
(13) 12-17 Février	V 89,5	33,7	6	147,0	52,6	6	0,609**	67,8	31,2	6	77,2	36,7	6	0,879*
(14) 18-29 Février	95,7	69,1	8	139,7	88,4	8	0,685*	68,4	14,2	8	72,7	22,6	8	0,940*
(15) 1-25 Mars	101,3	50,7	20	198,5	105,9	20	0,510**	74,9	38,3	20	82,9	46,4	20	0,903*
(16) 26 Mars-9 Avril	V 50,6	25,3	14	102,1	23,4	14	0,496**	16,4	3,0	14	18,3	3,7	14	0,895*
(17) 10-30 Avril	65,5	22,8	21	102,6	33,3	21	0,638**	31,7	10,3	21	35,0	12,5	21	0,905*
(18) Mai, 1972	47,9	21,0	28	82,1	43,0	28	0,583**	24,7	12,7	28	25,9	14,9	28	0,957*

Validité du *t* de Student pour un risque de 5 pour cent.

* Différence non significative. ** Différence significative.

L'appareil situé à l'intérieur du bâtiment est placé sur un palier entre deux salles de classes, chacune de 13×6 m de surface et de 3,20 m de hauteur. Chaque classe a trois fenêtres simples de $1,20 \times 2$ m et est occupée pendant la durée de l'enseignement en moyenne par 42 enfants de 7 à 9 ans et un maître. Le système de chauffage est assuré par des radiateurs; aucun système de ventilation artificielle n'est prévu. Il n'y a pas à notre connaissance de sources de pollution intérieure, comme celles produites par les cigarettes. Les murs sont en briques, recouverts de plâtre et de peinture, construction 1925-1930.

Les locaux sont vides pendant les vacances scolaires.

Les résultats portent sur 361 paires de valeurs pour l'acidité forte et sur 370 paires pour les fumées noires. Ils sont divisés en 18 tranches, qui traduisent les différentes phases d'occupation des locaux. L'unité de temps d'un groupe de résultats est le mois, aux exceptions suivantes près.

Pour des périodes de vacances, dont la durée est inférieure au mois (Noël, Pâques), les jours fériés forment une tranche à part. Si au cours du même mois, il y a aussi des jours avec enseignement, ces jours forment une période distincte (par exemple le mois de Février, 1972).

Quand l'enseignement (l'occupation) commence au cours d'un mois de calendrier (par exemple, le 14 Septembre), les deux moitiés du même mois sont considérées comme tranches distinctes (Tableau 1).

RESULTATS ET LEUR EXPLOITATION

1. Le Tableau 1 donne, l'ensemble des résultats obtenus pendant la période d'étude pour l'acidité forte et les fumées noires. Pour chacune des 18 tranches, on a calculé:

Les moyennes:

Les écarts-types correspondants:

Le nombre de degrés de liberté:

Le rapport des moyennes de l'intérieur sur l'extérieur:

La signification du *t* de Student.

2. La Fig. 1 présente les variations des 13 moyennes mensuelles de SO_2 , sans tenir compte des périodes d'occupation et de non-occupation.

3. Les Figs. 2 et 3 donnent les fréquences cumulées pour les deux polluants, à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, et se rapportent à l'ensemble des valeurs. Le fait qu'il s'agisse de droites, laisse penser que l'échantillonnage était représentatif.

4. Sur les Figs. 4 et 5 ont été tracées les droites de régression pour les 2 polluants.

(a) SO_2 (Fig. 4)

La droite de régression pour les 18 valeurs correspondant aux moyennes des 18 périodes est donnée par l'équation:

$$C_{\text{int.}}^{\text{SO}_2} = 0,5521 \cdot C_{\text{ext.}}^{\text{SO}_2} + 13,71 \quad \mu\text{g m}^{-3}.$$

L'écart-type S_{SO_2} correspondant est égal à $\pm 11,67$. Les 2 parallèles à la droite sont tracées sur le même graphique.

La droite de régression pour l'ensemble des valeurs journalières des 13 mois d'étude a pour équation:

$$C_{\text{int.}}^{\text{SO}_2} = 0,5806 \cdot C_{\text{ext.}}^{\text{SO}_2} + 11,264 \quad \mu\text{g m}^{-3}.$$

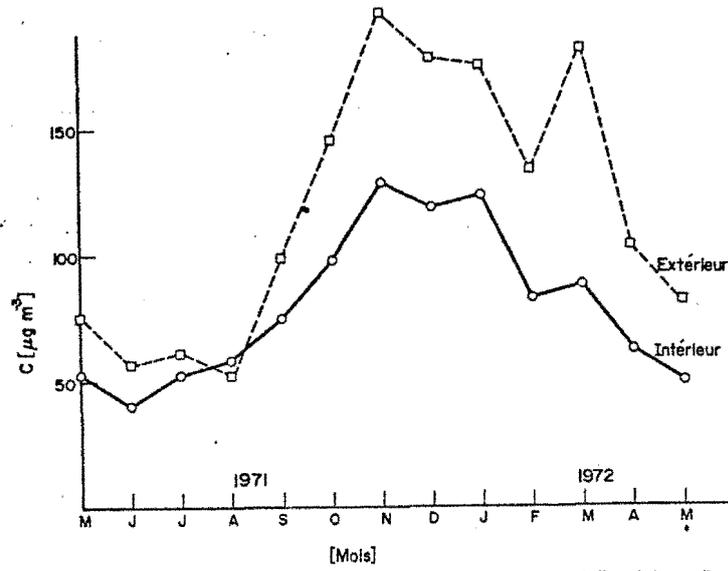


Fig. 1. Variation des moyennes mensuelles de SO₂ à l'intérieur et à l'extérieur d'une école.

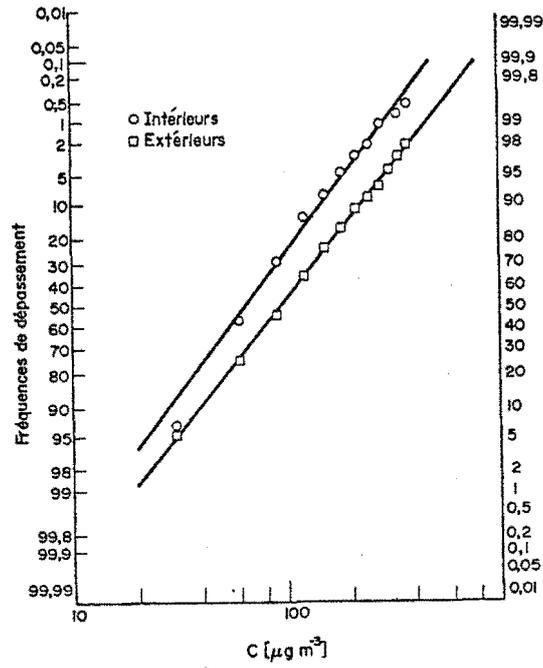


Fig. 2. Fréquences de dépassement de concentrations de SO₂ à l'intérieur et à l'extérieur d'une école.

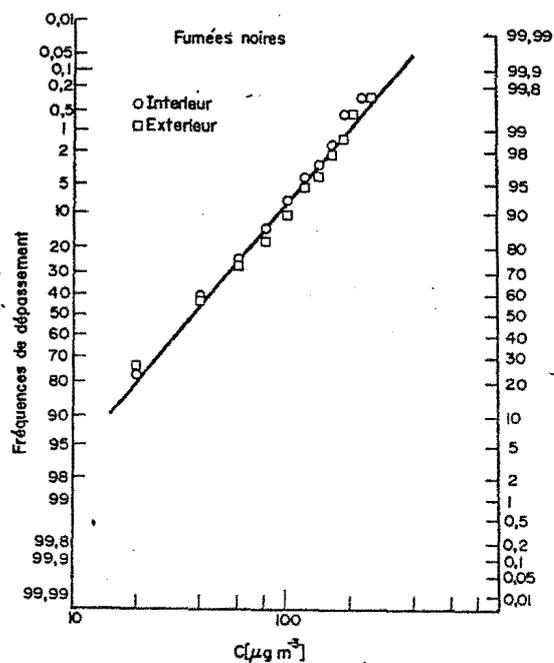


Fig. 3. Fréquences de dépassement des taux de fumées noires à l'intérieur et à l'extérieur d'une école.

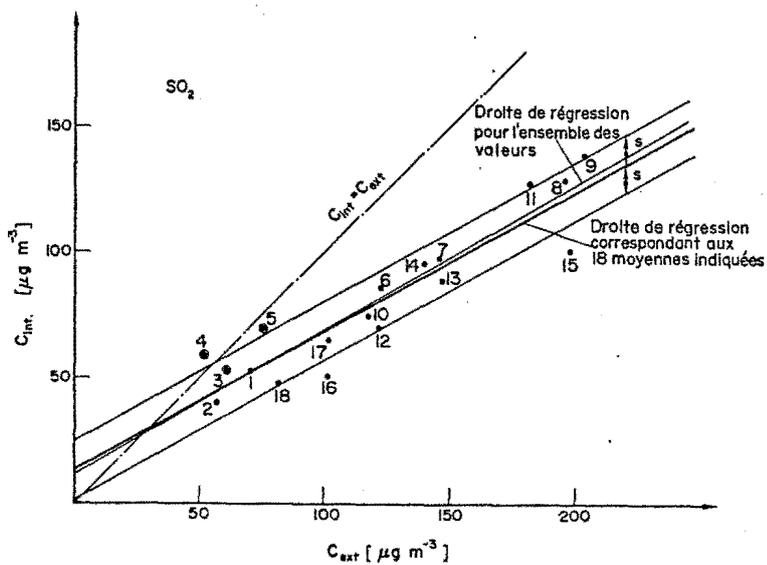


Fig. 4. Corrélogramme et droites de régression pour SO_2 .

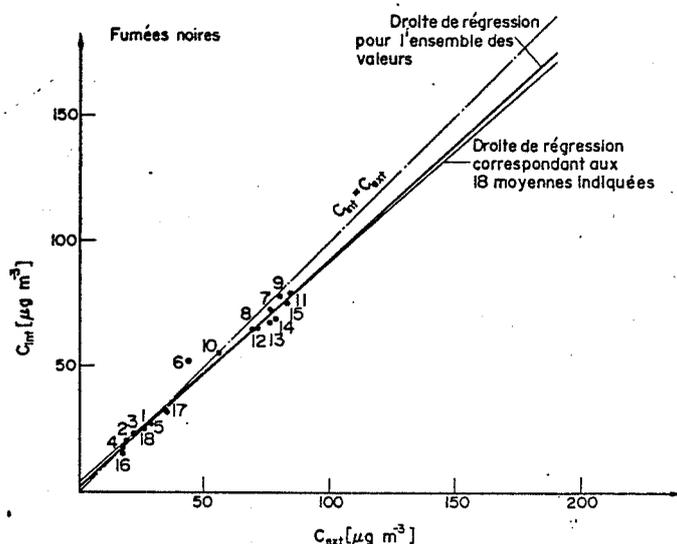


Fig. 5. Corrélogramme et droites de régression pour les fumées noires.

Le coefficient de corrélation pour 361 degrés-de-liberté a été calculé pour l'ensemble des valeurs journalières; il est égal à $r_{SO_2} = 0,8969$

(b) *Fumées noires* (Fig. 5)

Les mêmes calculs que pour l'acidité forte ont été effectués.

La droite de régression pour les moyennes des 18 périodes a pour équation :

$$C_{int.}^{FUM} = 0,9109 \cdot C_{ext.}^{FUM} + 2,2144 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}, \text{ avec un écart-type } S_{FUM} = \pm 3,182.$$

Le calcul de l'équation de la droite de régression pour l'ensemble des taux journaliers donne :

$$C_{int.}^{FUM} = 0,8766 \cdot C_{ext.}^{FUM} + 3,9745 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}.$$

Le coefficient de corrélation est :

$$r_{FUM} = 0,9645 \text{ pour } 361 \text{ degrés-de-liberté.}$$

6. Sur les 13 mois d'étude, nous avons trouvé 5 épisodes de forte pollution en acidité forte, représentant en tout, 25 jours de concentrations élevées. Les rapports (sur les valeurs journalières) :

$$\left(\frac{C_{int.}}{C_{ext.}} \right)_{SO_2} \text{ varie de } 0,290 \text{ à } 0,780 \text{ avec une moyenne de } 0,590.$$

ANALYSE DES RESULTATS

Pour l'ensemble de la période, les moyennes des concentrations extérieures sont supérieures aux moyennes des concentrations intérieures pour l'acidité forte. Nous trouvons en moyenne que les concentrations intérieures en SO₂ sont égales à 71 pour cent de celles

de l'extérieur, la rapport variant de 0,496 à 1,126, avec une moyenne égale à 0,710.* Cette valeur est très supérieure à celle indiquée par Biersteker *et al.* (1956). Le rapport donné par Andersen (1972) se situe dans la fourchette que nous avons également constatée.

En ce qui concerne les fumées noires, les concentrations sont équivalentes pour l'extérieur et l'intérieur. Ces dernières sont égales à 97 pour cent de celles de l'extérieur. Cette valeur est beaucoup plus élevée que celle de Derouane (1972) et Biersteker *et al.* (1965); elle est par contre identique à celle indiquée par Yocom (1971) qui trouve un rapport égal à l'unité.

Le test de Student (effectué sur les 18 périodes d'étude—Tableau 1) montre une différence *non* significative entre les moyennes intérieures et extérieures de SO₂ dans un tiers des cas. Pour les fumées noires, le test de Student montre une différence *non* significative entre les valeurs intérieures et extérieures dans *tous les cas*.

Les coefficients de corrélation sont hautement significatifs pour les 2 polluants:

La signification est meilleure pour les fumées, ce qui est en accord avec les paragraphes précédents.

Les droites de régression représentatives des 18 moyennes et des valeurs journalières sont pratiquement confondues pour les 2 polluants (voir Figs. 4 et 5);

Pour les fumées, ces droites sont de la forme $y = x$ (Fig. 5) avec une pente légèrement plus faible que l'unité;

Tandis que pour SO₂ la pente est bien inférieure à l'unité (voir Fig. 4).

Les droites des fréquences cumulées sont parallèles pour SO₂ (entre l'intérieur et l'extérieur) et confondues pour les fumées noires.

CONCLUSION

Le bâtiment choisi pour effectuer les prélèvements—une école—nous permet de tester un facteur important: influence de l'occupation ou de la non-occupation du local.

Dans le présent cas, le nombre précis de personnes (élèves) est connu ainsi que leurs habitudes de non-fumeurs.

L'ensemble des résultats démontre que l'occupation de l'école par les élèves n'apporte aucune modification significative sur le rapport des concentrations intérieures et extérieures des deux polluants (SO₂ et fumées noires).

En conséquence:

D'une part, les différences significatives entre la concentration du SO₂ à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment (c'est à dire $C_{int.} \approx 71$ pour cent $C_{ext.}$) doivent être attribuées au *bâtiment* et non au fait de l'occupation.

D'autre part, la concentration en fumées noires est à peu près la même à l'intérieur comme à l'extérieur du bâtiment, et ceci, indépendamment de son occupation.

* *Addenda*: Les mesures de SO₂ et des fumées noires ont été poursuivies après la rédaction de ce rapport pendant 4 périodes (l'une avec occupation, et les trois autres correspondant aux vacances). Sans donner ici les détails des résultats, nous trouvons les rapports suivants pour les 4 périodes:

$$\left(\frac{C_{int.}}{C_{ext.}}\right)_{SO_2} : 0,601-0,595-0,824-0,837$$

dont la moyenne est 0,714, égale à la moyenne générale citée plus haut.

Les résultats trouvés pour ces 4 périodes concordent en tous points avec les conclusions de cette étude.

REFERENCES

- Andersen I. (1972) Relationships between outdoor and indoor air pollution. *Atmospheric Environment* 6, 275-278.
- Benson F. B., Henderson J. J. and Caldwell D. E. (1972) Indoor-outdoor air pollution relationships: A literature review. U.S. Environment Protection Agency Publication No. AP-112.
- Biersteker K., de Graaf H. and Nass Ch. A. G. (1965) Indoor air pollution in Rotterdam homes. *Int. J. Air Wat. Poll.* 9, 343-350.
- Derouane A. (1972) Comparaison des concentrations en fumées à l'extérieur et à l'intérieur des lieux d'habitation. *Atmospheric Environment* 6, 209-220.
- Megaw W. J. (1962) The penetration of iodine into buildings. *Int. J. Air Wat. Poll.* 6, 121-128.
- Yocom J. E., Clink W. L. and Cote W. A. (1971) Indoor/outdoor—air quality relationships. *APCA J.* 21(5).