

MESURES IN SITU DU COEFFICIENT MOYEN
DES ECHANGES SUPERFICIELS INTERIEURS*

S. Martorana et C. Bianchi
Politecnico di Milano
Dipartimento di Energetica

1. Introduction

Au cours des années 1984-1986, nous avons réalisé un programme d'essais sur 6 bâtiments situés dans l'Italie du Nord (Alba, Parma, Schio, Tortona) et dans l'Italie du Sud (Campobasso, Lucera).

On a utilisé 38 logements, pour un total de 150 locaux (1,2,3), et on a mesuré: les hétérogénéités des températures superficielles des parois de façade, à l'aide de la thermographie infrarouge; les résistances thermiques des parois les plus significatives; les paramètres microclimatiques des locaux (température, humidité relative et vitesse de l'air; température rayonnante moyenne des parois); les facteurs de lumière du jour des locaux significatifs; l'isolement acoustique normalisé des parois et des éléments de façade, l'isolement normalisé des planchers aux bruits aériens et aux bruits de chocs, l'isolement des bruits des équipements. Les mesures acoustiques ont été effectuées par l'Istituto di Fisica Tecnica della Facoltà di Ingegneria di Bologna.

Nous avons saisi l'occasion pour vérifier la fiabilité des valeurs des coefficients d'échanges superficiels, ainsi que des méthodes pour les calculer.

Cette communication concerne le coefficient d'échanges superficiels intérieurs.

* Conventions de recherche Dipartimento di Energetica del Politecnico di Milano/Ispretil S.p.A. di Roma 03.02.1984 et 31.10.1984, financées par l'Administration (Comitato Edilizia Residenziale (CER), art. 2, lettre F, Loi 457/78).

2. Position du problème

2.1. Les conditions aux limites de l'équation indéfinie de la conduction de la chaleur sont généralement linéarisées, où coexistent des échanges thermiques par convection et par rayonnement, avec des relations telles que (4):

$$h \cdot (t_f - t_s) = -k \cdot (\partial t / \partial n)_s \quad (1)$$

avec n normale à la surface, orientée vers l'intérieur du corps, et

$$h = h_c + h_r \quad (2)$$

avec

$$h_c \left\{ \begin{array}{l} = 0,56 \cdot (k/L) \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/4} \text{ pour } (Gr \cdot Pr) = 10^4 \div 10^8 \\ = 0,13 \cdot (k/L) \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3} \text{ pour } (Gr \cdot Pr) = 10^9 \div 10^{12} \end{array} \right. \quad (3.a)$$

$$h_c \left\{ \begin{array}{l} = 0,56 \cdot (k/L) \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/4} \text{ pour } (Gr \cdot Pr) = 10^4 \div 10^8 \\ = 0,13 \cdot (k/L) \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3} \text{ pour } (Gr \cdot Pr) = 10^9 \div 10^{12} \end{array} \right. \quad (3.b)$$

pour la convection naturelle et pour les surfaces planes verticales (5,6,7);

$$h_r = \sigma \cdot f(e_s, e_p, S_s, S_p, F_{sp}) \cdot (T_p^4 - T_s^4) / (t_f - t_s) \quad (4)$$

avec e_s, e_p les émissivités des surfaces S_s et S_p supposées grises, F_{sp} le facteur de forme.

2.2. La fonction $f(e_s, e_p, S_s, S_p, F_{sp})$ est exprimable par:

$$f(e_s, e_p, S_s, S_p, F_{sp}) = 1 / (1/e_s + (1/e_p - 1) S_s/S_p) \quad (5)$$

où les surfaces soient supposées à température uniforme et le facteur de forme F_{sp} est égal à 1 pour la géométrie de la figure 1.

2.3. Il s'ensuit que le flux thermique qui traverse la paroi suivant la normale en régime stationnaire ainsi que la densité du flux thermique sont donnés par:

$$\phi = h \cdot (t_f - t_s) \cdot S_s \quad (6)$$

et

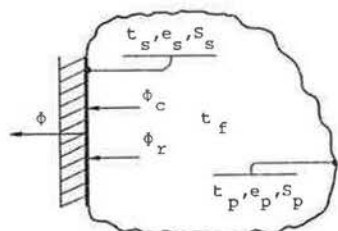


Fig. 1. Schéma des flux thermiques à la surface intérieure de la paroi

$$\phi = h \cdot (t_f - t_s) \quad (7)$$

3. Mesures in situ

3.1. La (7) a été utilisée pour déterminer les coefficients d'échanges superficiels par la mesure directe in situ de la densité de flux thermique et des températures t_f et t_s ; le schéma du système de mesure est représenté par la figure 2. Le même schéma a été utilisé pour mesurer la résistance thermique des parois.

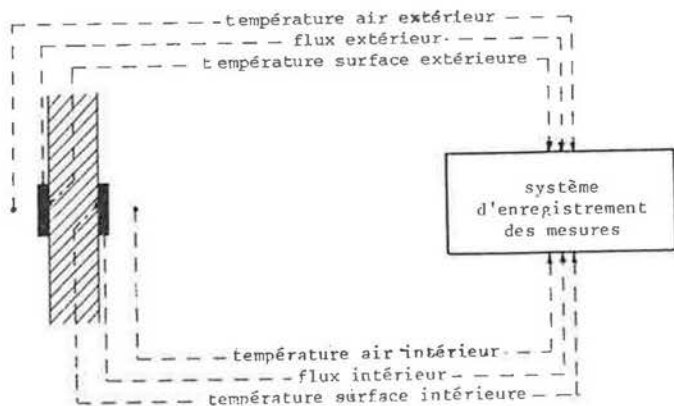


Fig. 2. Chaîne de mesure

3.2. La stationnarité du flux thermique a été vérifiée par des enregistrements de longue durée des températures de l'air intérieure et extérieure, des températures superficielles intérieures et extérieures et du flux thermique même. Les mesures ont été effectuées au cours des séquences froides les plus longues et au moins pour trois jours consécutifs.

Les zones de mesure à flux unidirectionnel, qui ont été choisies sur parois exposées pour la plupart au nord, ont été localisées avec la thermographie infrarouge associée à des mesures ponctuelles des températures superficielles. La thermographie infrarouge a été utilisée encore, les fluxmètres installés, pour vérifier la conservation de la unidirectionnalité du flux thermique.

3.3. Le projet du système de mesure a été optimisé par l'analyse des erreurs; l'approximation poursuivie pour la mesure de h a été de $\pm 10\%$.

L'expression de l'erreur probable

$$\Delta h/h = \pm \sqrt{(\Delta\phi/\phi)^2 + (\Delta(t_f - t_s)/(t_f - t_s))^2} \quad (8)$$

a suggéré, pour les mesures in situ, des approximations de $\pm 4\%$ pour le flux thermique et des approximations de $\pm 8\%$ pour la différence de température entre l'air et la paroi.

L'excellent accord entre les résistances thermiques des parois, qui ont été mesurées simultanément au coefficient h , et les résistances calculées, représente une vérification indirecte du niveau de fiabilité des mesures des susdits coefficients d'échange superficiels.

4. Résultats

Les résultats sont résumés dans les tableaux 1, 2, 3 et 4.

4.1. Le tableau 1 concerne les valeurs du coefficient de convection h_c calculées pour les températures mesurées; la hauteur de la paroi est la même pour tous les bâtiments: $L = 2,7$ m.

Le tableau 2 concerne les valeurs du coefficient de rayonnement h_r , calculées pour les températures T_f et T_s mesurées, pour les géométries de chaque local et sous les hypothèses suivantes:

- $T_p = T_f$, sauf pour le bâtiment A où la valeur de T_p a été mesurée car il est chauffé par rayonnement (1/3 au plafond, 2/3 au plancher);
- $e_p = e_s = 0,9$.

Tableau 1. Valeurs de h_c calculées pour les températures mesurées et pour $L = 2,7$ m

bât	mes	t_f	t_s	t	T_m	$k \cdot 10^2$	$v \cdot 10^6$	Pr	Gr.Pr $\cdot 10^{-9}$	h_c
A	1	24,7	23,1	1,6	297,1	2,628	15,50	0,702	3,037	1,832
B	2	29,0	27,5	1,5	301,4	2,662	15,91	0,701	2,660	1,776
B	3	28,4	26,0	2,4	300,4	2,657	15,85	0,701	4,303	2,081
C	4	23,5	19,9	3,6	294,6	2,618	15,39	0,702	6,984	2,409
D	5	20,9	18,4	2,5	292,8	2,597	15,14	0,703	5,055	2,146
D	6	16,6	14,7	1,9	288,8	2,563	14,75	0,704	4,109	1,977
D	7	20,5	17,7	2,8	292,3	2,594	15,11	0,703	5,693	2,230
E	8	19,4	17,5	1,9	291,6	2,585	15,01	0,703	3,924	1,963
F	9	21,9	20,4	1,5	294,3	2,605	15,24	0,703	2,978	1,805
F	10	18,8	17,6	1,2	291,4	2,580	14,95	0,703	2,500	1,686

Tableau 2. Valeurs de h_r calculées pour les températures mesurées T_f et T_s ainsi que pour les géométries de chaque local.

bât	mes	T_f	T_s	T_p	$e_p = e_s$	$\frac{S_s}{S_p}$	h_r
A	1	297,9	296,3	299,2	0,9	0,200	9,574
B	2	302,2	300,7	302,2	0,9	0,386	5,385
B	3	301,6	299,2	301,6	0,9	0,187	5,431
C	4	296,7	293,1	296,7	0,9	0,175	5,145
D	5	294,1	291,6	294,1	0,9	0,142	5,054
D	6	289,8	287,9	289,8	0,9	0,142	4,850
D	7	293,7	290,9	293,7	0,9	0,205	4,962
E	8	292,6	290,7	292,6	0,9	0,327	5,041
F	9	295,1	293,6	295,1	0,9	0,145	4,978
F	10	292,0	290,8	292,0	0,9		

4.2. Le tableau 3 concerne les valeurs calculées du coefficient d'échanges superficiels, les valeurs mesurées ainsi que les écarts en pourcentage.

Les écarts sont modestes, en moyenne moins du 7% environ, pour les mesures 1, 2, 4, 8, 9; ils sont remarquables et incompatibles avec l'hypothèse $T_p = T_f$ pour les mesures 3, 5, 6 et 7.

La mesure des paramètres microclimatiques, effectuée simultanément aux mesures de résistance thermique, avait signalé pour les bâtiments objet des mesures 5, 6 et 7, des humidités relatives particulièrement élevées

et des températures radiantes moyennes particulièrement basses par rapport aux autres bâtiments; pour le bâtiment objet de la mesure 3, la sus-dite mesure avait signalé une température radiante moyenne anormalement basse.

Pour ces bâtiments la chute des échanges thermiques par rayonnement était, par conséquent, prévisible, ainsi que la surestimation des échanges calculés suivant l'hypothèse $T_p = T_f$ (tableau 2).

Pour les bâtiments objet des mesures 5, 6 et 7 il nous a paru raisonnable attribuer la diminution de la température T_p à l'évaporation des eaux de construction et par conséquent de supposer T_p égale à la température humide de l'air, évidemment pour les seules surfaces poreuses. Les valeurs des coefficients d'échanges superficiels ainsi recalculés confirment cette hypothèse (tableau 4). Dans le cas des mesures 5 et 7 toutes les surfaces sont poreuses sauf celle du plancher; dans le cas de la mesure 6 seulement le plafond est poreux.

Tableau 3. Valeurs de h calculées, valeurs de h mesurées, écarts.

bât	A	B	B	C	D	D	D	E	F	F
mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h_{cal}	11,41	7,16	7,51	7,55	7,20	6,83	7,26	6,93	6,85	6,66
h_{mes}	10,35	7,76	5,02	6,87	3,63	4,92	3,86	6,27	6,79	6,44
$\frac{h_{cal} - h_{mes}}{h_{mes}} (\%)$	10,2	-7,7	50,4	9,9	98,3	38,8	88,1	10,5	0,9	3,4

Pour le local objet de la mesure 3, la basse température radiante moyenne est due à la contiguïté de certaines parois avec les parties non chauffées du bâtiment. Evidemment aucune hypothèse généralisable est possible sur cette température.

5. Conclusions

5.1. Les valeurs calculées et celles mesurées du coefficient d'échanges superficiels intérieurs se recoupent de façon satisfaisante pour des conditions d'essai cohérentes avec les hypothèses de calcul et dans le cas des géométries les plus courantes des locaux des logements.

La moyenne des valeurs calculées, égale à $7,03 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$, est en effet en bon accord avec celle des valeurs mesurées qui vau $6,83 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$.

Tableau 4. Calcul du coefficient h_r supposant qu'une partie de la surface S_p soit à la température humide de l'air; comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées de h .

mes	5	6	7
T_f	294,1	289,8	293,7
$T_{f\text{hum}}$	291,6	285,9	291,2
T_s	291,6	287,9	290,9
T_p	292,2	288,9	291,8
e_p	0,9	0,9	0,9
e_s	0,94	0,91	0,94
S_p^p/S_p	0,142	0,142	0,142
h_r	1,210	2,432	1,612
h_{cal}	3,36	4,41	3,84
h_{mes}	3,63	4,92	3,86
$\frac{h_{\text{cal}} - h_{\text{mes}}}{h_{\text{mes}}} (\%)$	-7,4	-10,4	-0,5

Ces valeurs sont toutefois un peu moindre de celles les plus répendues car les conditions d'essai sont différentes des conditions réelles des logements habités.

5.2. Les échanges thermiques par convection sont nettement moins importants de celles par rayonnement; leurs variations avec les températures observées pendant les essais, influencent peu la valeur du coefficient d'échanges superficiels.

Le rayonnement vaux presque 70% de ce coefficient. Par conséquent la réduction de ces échanges peut contribuer sensiblement à limiter les déperditions thermiques des parois. Le mécanisme consiste dans la réflexion de la chaleur radiante à la surface des parois, avant d'en réduire la conduction avec des isolants thermiques.

6. Symboles et unités de mesure

6.1. Nomenclature

A	bâtiment de Alba
B	bâtiment de Campobasso
C	bâtiment de Lucera

c_p	(J/kg K)	chaleur spécifique à pression constante
D		bâtiment de Parma
E		bâtiment de Schio
e^*	(-)	émissivité
F_{sp}		bâtiment de Tortona
F_{sp}	(-)	facteur de forme
$Gr = (L^3 g \Delta t) / (T_m \nu^2)$	(-)	numéro de Grashof
$g = 9,80665$	(m/s ²)	accélération de gravité
h	(W/m ² K)	coefficient d'échanges superficiels
k	(W/m K)	conductivité thermique
$L = 2,70$	(m)	hauteur de la paroi
$Pr = (\mu c_p) / k$	(-)	numéro de Prandtl
S	(m ²)	superficie
T	(K)	température absolue
$T_m = (T_p + T_s) / 2$	(K)	température moyenne de l'air à la surface
t	(°C)	température Celsius
$\Delta t = t_f - t_s$	(°C)	différence de température air-surface

6.2. Lettres grèques

Δ		différence
ν	(N s/m ²)	viscosité
μ	(m ² /s)	viscosité cinématique
$\sigma = 5,66961 \cdot 10^{-8}$	(W/m ² K ⁴)	constante de Stefan-Boltzman
ϕ	(W)	flux thermique
φ	(W/m ²)	densité de flux thermique

6.3. Indices

c	convection
f	fluide
p	parois intérieures
r	rayonnement
s	surface intérieure de la paroi extérieure

6.4. Abrégés

bât	bâtiment
cal	calculé
hum	humide
mes	numéro de la mesure; mesuré

7. Bibliographie sommaire

- (1) S. Martorana, C. Bianchi, G. Dassù, E. Pedrocchi "Sperimentazione sulle prestazioni ambientali di edifici ubicati in Alba, Lucera, Parma, Tortona: analisi termografica; misure di resistenza termica delle pareti, di parametri microclimatici, di fattore di luce diurna" - Relazione conclusiva di ricerca all'Ispredil nell'ambito della sperimentazione edilizia per subsistemi Ispredil-CER - 27.02.1985 - 3 vol. pagg. 240 - 15 - 36.
- (2) S. Martorana, C. Bianchi, G. Dassù, E. Pedrocchi "Sperimentazione sulle prestazioni ambientali di edifici ubicati in Campobasso e Schio: analisi termografica; misure di resistenza termica delle pareti, di parametri microclimatici, di fattore di luce diurna" - Relazione conclusiva di ricerca all'Ispredil nell'ambito della sperimentazione edilizia per subsistemi Ispredil-CER - 31.01.1986 - 3 vol. pagg. 127 - 10 - 21.
- (3) S. Martorana, C. Bianchi "La sperimentazione in campo sulle prestazioni ambientali" - Rapporto di sintesi all'Ispredil nell'ambito della sperimentazione edilizia per subsistemi Ispredil-CER - 22.09.1986 - 1 vol. pagg. 41.
- (4) S. Martorana "Les propriétés isolantes des vitrages à faible émissivité", 2th International Colloquium of Energy Saving, Budapest 25th-26th March 1982, résumé dans Prefabbricare Edilizia in Evoluzione 5/82.
- (5) M. Jakob "Heat Transfer" - John Wiley & Sons Inc. - vol. 1, 1949, vol. 2, 1957.
- (6) V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel "Heat Transfer" - MIR Publisher Moscow - Third Edition 1980.
- (7) ASHRAE Fundamentals 1981.