

P. Nusgens (1)
M. Guillaume (2)

VENTILATION NATURELLE DES MAISONS INDIVIDUELLES

Afin de réduire les besoins d'énergie pour le chauffage des bâtiments, nous avons considérablement amélioré l'isolation thermique de l'enveloppe des nouveaux bâtiments.

De ce fait, la ventilation, nécessaire à la survie de tout être humain au sein d'un bâtiment, prend une part de plus en plus importante dans les consommations d'énergie.

Il devient dès lors primordial de bien connaître et de bien pouvoir prédéterminer les phénomènes de ventilation.

C'est dans ce but que l'on résume dans ce texte les principaux résultats de trois campagnes de mesures dans des logements individuels, pour la plupart du type « social ».

Ces trois campagnes illustrent les différentes étapes réalisées dans la compréhension du phénomène.

Cependant, un travail important reste encore à faire, plus particulièrement dans la corrélation entre les mesures d'étanchéité à l'air des différents composants d'un logement et les mesures, au gaz traceur, des taux de renouvellement d'air.

1. GENERALITES

1.1 Introduction

L'être humain ne peut vivre à l'intérieur d'un bâtiment sans qu'il y ait, au sein de celui-ci, un apport minimal d'air frais.

Cependant, avec la crise énergétique que nous connaissons depuis 1973, l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments croît considérablement et, dans les besoins énergétiques sans cesse décroissants pour le chauffage de ces bâtiments, on s'aperçoit que ceux nécessités par la ventilation prennent une part de plus en plus importante.

Il s'avéra donc rapidement utile de mieux dominer le phénomène « ventilation des bâtiments » afin de réduire les besoins ou du moins, afin de mieux les prédéterminer.

C'est dans cette optique que nous nous sommes lancés dans plusieurs campagnes de mesures in situ dont les trois relatives ici illustrent bien l'évolution que nous avons suivie dans la tentative de compréhension des phénomènes constatés.

1.2 Lois de variation de la teneur en gaz traceur d'un local après injection

1.21 Notations

Voici les principales notations utilisées dans cette étude :

q : quantité de gaz traceur injectée dans un logement (m^3)

r_i (r_1, r_2) : taux de renouvellement d'air dans un local i

t : temps (h)

(1) Ingénieur civil, Premier assistant à la Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège.

(2) Ingénieur civil, chef de laboratoire, département Recherche et développement, C.S.T.C.

v_i (v_1, v_2) : quantité d'air entrant dans un local i

V_i (V_1, V_2) : volume du local i (m^3)

X_i (X_1, X_2) : concentration volumique de gaz traceur dans un local i (% vol.)

$X_{i,0}$ ($X_{1,0}, X_{2,0}$) : concentration initiale (% vol.)

X_e : concentration de gaz traceur dans l'air extérieur (% vol.)

1.22 Cas d'un seul local

La figure 1 représente schématiquement le cas d'un seul local comportant une fenêtre extérieure.

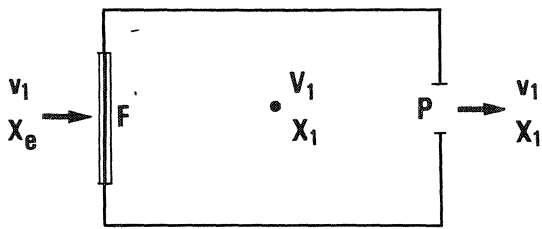


Fig. 1.
F : fenêtre
P : porte

Lois théoriques

L'équilibre interne à tout moment s'exprime par la relation :

$$V_1 dX_1 = v_1 X_e dt - v_1 X_1 dt$$

ou bien

$$X'_1(t) = \frac{v_1}{V_1} (X_e - X_1(t)). \quad (1)$$

Nous appellerons $\frac{v_1}{V_1} = r_1$ le taux de renouvellement d'air.

La relation (1) mise sous la forme :

$$X'_1(t) = r_1 (X_e - X_1(t)) \quad (2)$$

est une équation différentielle linéaire non homogène dont la solution est :

$$X_1(t) = X_e + (X_{1,0} - X_e) e^{-r_1 t} \quad (3)$$

où $X_{1,0}$ est la valeur de X_1 à l'instant 0.

La relation (3) peut également se mettre sous la forme :

$$\ln(X_1(t) - X_e) = \ln(X_{1,0} - X_e) - r_1 t \quad (4)$$

si $X_{1,0} > X_e$

ou bien sous la forme :

$$\ln(X_e - X_1(t)) = \ln(X_e - X_{1,0}) - r_1 t \quad (4 \text{ bis})$$

si $X_{1,0} < X_e$

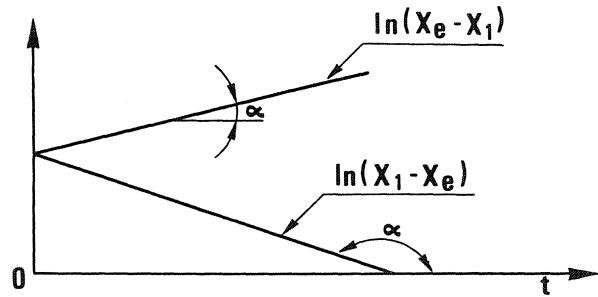


Fig. 2.

Les relations (4) et (4 bis) portées en graphique semi-logarithmique (fig. 2) donnent des droites.

La pente de celles-ci vaut $\text{tg} \alpha = -r_1$ ce qui sera un moyen simple pour déterminer le taux de renouvellement d'air r_1 .

Remarque

Nous pouvons également obtenir graphiquement r_1 , mais de façon moins précise, à l'aide de la relation (3), qui est portée en graphique à la figure 3.

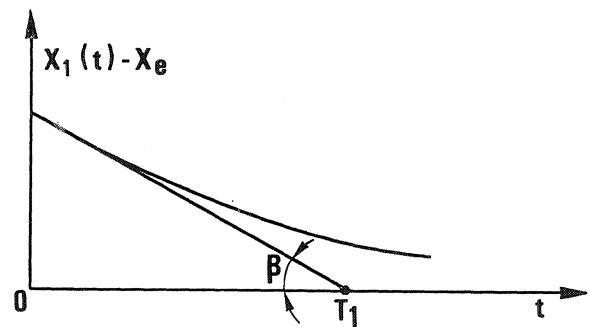


Fig. 3.

Au temps T_1 , la tangente à la courbe aura pour équation :

$$X_{1,0} - X_e = T_1 \text{tg} \beta \quad (5)$$

Suivant la relation (2), $\text{tg} \beta$ vaudra

$$-r_1 (X_e - X_{1,0}).$$

Dès lors, la relation (5) donne :

$$(X_{1,0} - X_e) = -r_1 T_1 (X_e - X_{1,0}) \quad (6)$$

ou bien, après simplifications :

$$-r_1 = \frac{1}{T_1} \quad (7)$$

Cette méthode sera moins précise que la précédente, étant donné l'imprécision du tracé de la tangente initiale; cependant, elle pourra être utilisée comme moyen rapide pour déterminer r_1 en cours d'essais.

1.23 Cas de plusieurs locaux

1.23.1 Lois théoriques pour deux locaux

Le cas simplifié de deux locaux peut se repré-

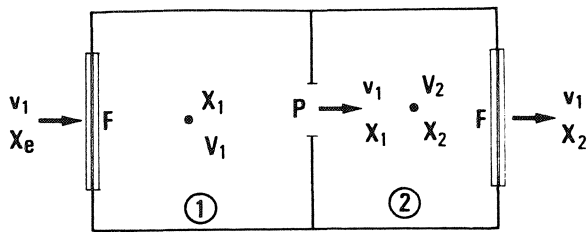


Fig. 4.
F : fenêtres
P : porte
1 et 2 : locaux

senter schématiquement suivant la figure 4. Nous reprendrons le même raisonnement qu'au paragraphe 1.22 ci-dessus.

L'équilibre interne donne pour le local 1 :

$$X_1 = X_e - (X_e - X_{1,0}) e^{-r_1 t} \quad (8)$$

L'équilibre interne donne pour le local 2 :

$$X'_2 = \frac{v_1}{V_2} X_e - \frac{v_1}{V_2} (X_e - X_{1,0}) e^{-r_1 t} - \frac{v_1}{V_2} X_2. \quad (9)$$

En posant :

$$X_{2,0} = \frac{V_1}{V_1 - V_2} (X_e - X_{1,0})$$

$$\text{et } r_2 = \frac{v_1}{V_2},$$

nous obtenons après résolution de l'équation (9) :

$$X_2 = e^{-r_2 t} r_2 X_e t + X_{2,0} e^{-(2r_2 + r_1) t}. \quad (10)$$

La relation (10) nous permet de trouver la valeur de la tangente initiale (en $t = 0$) qui est :

$$\left(\frac{dX_2}{dt} \right)_{t=0} = r_2 X_e + (-2r_2 + r_1) X_{2,0}, \quad (11)$$

relation dans laquelle tous les facteurs sont connus sauf r_2 .

Nous pourrions donc graphiquement, grâce à la relation (11), obtenir la valeur de r_2 .

1.23.2 Cas général

Le cas précédent, bien que simplifié, conduit à des résultats complexes qui le deviendront davantage si l'on considère les cas généraux de plusieurs locaux.

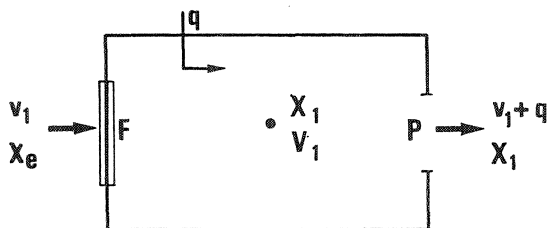


Fig. 5.
F : fenêtre
P : porte

Nous n'envisagerons ici que la méthode expérimentale suivante.

La quantité totale de gaz traceur (pour l'entière du logement) à tout instant t sera donnée par la relation :

$$\sum_i X_i(t) V_i = X(t) \sum_i V_i \quad (12)$$

ou bien

$$X(t) = \frac{\sum_i X_i(t) V_i}{\sum_i V_i} \quad (13)$$

On peut ainsi considérer l'ensemble du logement comme étant un seul local dans lequel la teneur en gaz traceur $X_i(t)$ est, à tout moment, donnée par la relation (13).

Dès lors, un graphique semi-logarithmique semblable à celui de la figure 2 donnera une droite dont la pente caractérisera le taux de renouvellement d'air global cherché.

1.24 Autre loi de variation de la teneur en gaz pendant l'injection

On n'envisagera que le cas d'une injection continue q constante d'un gaz traceur dans un local pendant un temps suffisamment long.

1.24.1 Cas général

Le schéma descriptif de l'essai est repris à la figure 5. L'équilibre interne à tout moment peut s'exprimer par la relation :

$$V_1 dX_1 = q dt + v_1 X_e dt - (v_1 + q) X_1 dt \quad (14)$$

ou bien

$$X'_1 = \frac{q}{V_1} + r_1 X_e - \left(r_1 + \frac{q}{V_1} \right) X_1, \quad (15)$$

ce qui est une équation différentielle dont la solution est :

$$X_1 = \left(X_{1,0} - \frac{q}{V_1} - r_1 X_e \right) e^{-\left(r_1 + \frac{q}{V_1} \right) t} + \left(\frac{q}{V_1} + r_1 X_e \right). \quad (16)$$

1.24.2 Cas particulier

L'équation générale (16) donnera, dans le cas où la teneur en gaz traceurs de l'air extérieur est négligeable :

$$X_1 = \frac{q}{V_1} + \left(X_{1,0} - \frac{q}{V_1} \right) e^{-\left(r_1 + \frac{q}{V_1} \right) t}. \quad (17)$$

La relation (17) peut également se mettre sous la forme :

$$\ln \left(X_1 - \frac{q}{V_1} \right) = \ln \left(X_{1,0} - \frac{q}{V_1} \right) - \left(r_1 + \frac{q}{V_1} \right) t. \quad (18)$$

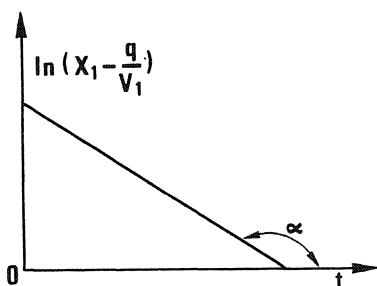


Fig. 6.

Cette loi est portée en graphique à la figure 6. Nous constatons que la pente de cette droite vaut :

$$\operatorname{tg} \alpha = - \left(r_1 + \frac{q}{V_1} \right), \quad (19)$$

relation dans laquelle $\frac{q}{V_1}$ est connu; ceci constitue un moyen simple pour déterminer r_1 .

1.25 Loi de décroissance de la teneur en gaz traceur

Cette loi est celle obtenue avec la plupart des gaz traceurs utilisés, comme par exemple le SF_6 , le N_2O_5 , le N_2O , le CO_2 et le O_2 .

Dans la suite de ce texte, nous traiterons des résultats d'essais obtenus avec le CO_2 , le N_2O et le O_2 .

L'injection du gaz traceur permet d'atteindre dans le logement la teneur initiale $X_{1,0}$ de la relation (4) ci-dessus car dans ce cas, la teneur initiale $X_{1,0}$ est supérieure à la teneur X_e de l'air extérieur.

La mesure de la décroissance de la teneur de ce gaz dans le logement permettra d'élaborer un graphique semblable à celui de la figure 2 et d'obtenir finalement le taux de renouvellement d'air cherché.

Si le gaz traceur utilisé n'est pas présent dans l'air extérieur (c'est par exemple le cas du SF_6), la relation (3) explicitée ci-dessus se simplifie et devient :

$$X_1(t) = X_{1,0} e^{-r_1 t}. \quad (20)$$

Dans ce cas, c'est toujours la pente de la droite du graphique semi-logarithmique de la figure 2 qui donnera le taux de renouvellement d'air cherché.

1.26 Loi de croissance de la teneur en gaz traceur

C'est la loi obtenue lorsque le gaz traceur utilisé est l'oxygène (O_2).

Dans ce cas, une injection importante d'azote (N_2) diminuera la teneur en O_2 de l'air intérieur au logement jusqu'à une valeur $X_{1,0}$ utilisée dans la relation (4 bis) car dans ce cas, $X_{1,0}$ est inférieure à la teneur X_e de l'air extérieur.

La mesure de la croissance de la teneur en O_2 dans le logement permettra d'élaborer un graphique semblable à celui de la figure 2 et d'obtenir finalement le taux de renouvellement d'air cherché.

1.3 Principe de la mesure

1.31 Instrumentation

1.31.1 Gaz traceur : N_2O ou CO_2

Dans ce cas, l'appareil de mesure est un analyseur de gaz à absorption sélective dans l'infrarouge.

Le principe de la mesure est le suivant : la cellule de mesure est divisée en deux enceintes identiques contenant du CO_2 ou du N_2O .

Ces deux enceintes reçoivent un rayonnement infrarouge qui, au préalable, a traversé respectivement une cellule de référence vide de gaz traceur et une cellule d'analyse parcourue de gaz à analyser; le gaz à analyser absorbe une partie du rayonnement proportionnelle à la teneur en gaz traceur et il en résulte un échauffement différent dans les deux enceintes de mesure. La différence de température ainsi créée entraîne une différence de pression entre les deux enceintes qui, convertie en grandeur électrique, fournit le signal de mesure.

1.31.2 Gaz traceur : O_2

Dans ce cas, l'appareil de mesure est un analyseur de gaz basé sur les propriétés paramagnétiques de l'oxygène et sur la dépendance de celles-ci vis-à-vis de la température; en effet, le paramagnétisme de l'oxygène diminue lorsque la température de celui-ci augmente.

Le gaz à analyser est soumis, dans une cellule de mesure, à un champ magnétique important créé par un aimant permanent entre les pôles desquels un filament chauffe le gaz avec lequel il est mis en contact.

Le champ magnétique ayant tendance à attirer le gaz froid et à refouler le gaz chaud, un véritable vent magnétique se crée dans la cellule de mesure et la vitesse de celui-ci dépend de la teneur en oxygène du gaz analysé.

Le filament réchauffeur est réalisé en matériau dont la résistance varie fortement avec la température; le vent magnétique aura pour effet de refroidir le filament et de faire varier la résistance de celui-ci.

Ce filament est inséré dans un pont de Wheatstone dont le déséquilibre servira de mesure de la vitesse du vent magnétique et donc de la teneur en oxygène du gaz à analyser.

1.32 Principe d'injection du gaz traceur

Dans une habitation, certaines pièces sont ventilées par de l'air extérieur et d'autres par de l'air provenant de pièces voisines.

Du point de vue énergétique, seul le débit total d'air extérieur présente un intérêt; c'est pourquoi il a été décidé, pour les essais relatés ici, d'effectuer des essais avec contamination de tout le logement.

L'injection du gaz (traceur dans le cas du CO₂ ou du N₂O, d'azote dans le cas de l'oxygène) se fait pendant une dizaine de minutes alors que l'ensemble de l'air du logement est fortement brassé par des ventilateurs; lors de cette injection, toutes les portes intérieures sont ouvertes et, dans chaque pièce, les ventilateurs assurent la répartition du contaminant.

L'injection terminée, les ventilateurs sont réglés sur leurs vitesses minimales afin de simuler mécaniquement, si le logement n'est pas chauffé pendant les essais, un brassage de l'air semblable à celui qu'apporterait une source de chauffage; lorsque les essais sont réalisés dans un logement chauffé, le système de chauffage suffit pour réaliser un mélange parfait du contaminant et de l'air ambiant.

2. MESURE DE LA VENTILATION DE LOGEMENTS INDIVIDUELS - PREMIERE CAMPAGNE DE MESURE

2.1 Description de la campagne

Dans le cadre d'une recherche sur la consommation réelle de combustible pour le chauffage des habitations, une campagne de mesures de ventilation naturelle a été effectuée (1). Les 3 maisons testées font partie d'un lotissement d'habitations sociales de construction traditionnelle (fig. 7). (Il faut remarquer que seules les façades avant et arrière sont munies d'ouvertures). Deux maisons (M3 et M7) ont été testées par la méthode de contamination pièce par pièce; la maison M8 a été étudiée par la méthode de contamination globale.

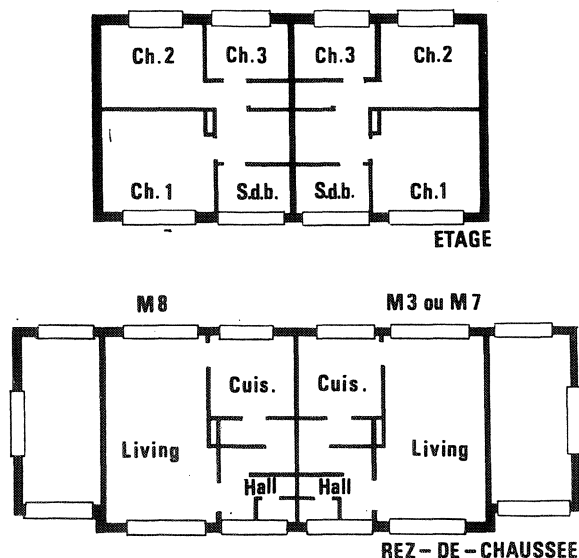


Fig. 7.

(1) Voir bibliographie n° 3.

2.2 Analyse de la campagne de mesure, pièce par pièce

Durant cette campagne, la maison M7 a été spécialement étudiée afin d'obtenir des résultats dans des situations climatologiques différentes (26 essais). Quelques essais de contrôle (un par local) ont été effectués dans la maison M3. On a repris dans le tableau 1 les résultats obtenus dans les deux maisons pour des conditions climatiques relativement semblables mais certainement pas identiques. Ceci peut expliquer les différences légères que l'on peut constater pour la plupart des pièces, excepté pour le living et la chambre 3.

En effet, pour le living, avec des orientations de vent assez proches, on constate :

- pour la maison 3, un taux de renouvellement de 0,3 vol./h avec une vitesse de vent d'environ 6 m/s
- pour la maison 7, un taux de renouvellement de 0,8 vol./h pour une vitesse de vent d'environ 4 m/s

La situation est encore plus grave pour la chambre 3 puisque, dans des conditions climatiques très proches, la maison 7 présente un

Tableau 1

Essai n°	Local	Vent (m/s)	Taux (vol./h)	Orientation
2	M3. CH1	2,0	0,5	
13	M7. CH1	2,4	0,3	
3	M3. CH3	5,0	0,4	
23	M7. CH3	5,6	3,8	
4	M3. CH2	3,9	1,7	
17	M7. CH2	4,9	1,8	
5	M3. Liv.	6,0	0,3	
7	M7. Liv.	3,9	0,8	

taux de 3,8 vol./h, soit près de dix fois celui de la maison 3.

Les mesures systématiques dans les différentes pièces de la maison 7 ne permettent pas d'établir généralement une relation entre le taux de renouvellement et la vitesse du vent.

Cela est dû à la difficulté d'obtenir un éventail de mesures suffisant en vitesse et en orientation.

On a pu obtenir une relation valable uniquement pour le living (fig. 8) qui possède des ouvertures (portes et fenêtres) sur deux parois opposées et qui, dès lors, est moins sensible à l'orientation du vent.

Pour ce local, on obtient une loi :

$$n_{(\text{vol./h})} = 0,11 + 0,16 V,$$

V étant la vitesse du vent relevée en site météorologique (à 10 m de hauteur) à la station la plus proche (environ 10 km).

D'autre part, les différents essais réalisés permettent d'estimer les taux de renouvellement pour une vitesse de vent météorologique de 4 m/s.

Ils sont repris dans le tableau 2 et comparés aux taux calculés suivant la norme DIN 4701 (1).

A l'exception du living, on constate une concordance satisfaisante entre les valeurs calculées et celles déduites des essais in situ

Tableau 2

Local	n suivant DIN 4701 (vol./h)	n estimé (vol./h)
Living	0,2	0,7
Cuisine	1,7	1,1
Chambre 1	0,5	0,7
Chambre 2	1,0	0,9 - 1,9
Chambre 3	1,9	2,2

Tableau 3 — Taux de renouvellement d'air (vol./h)

Essai \ Local	Chambre 1 SW	Chambre 2 NE	Chambre 3 NE	Living SW - NE	Cuisine NE
1	0,12	0,52	0,61	0,72	0,81
2	0,22	0,57	0,77	0,90	1,04
3	0,14	0,51	0,59	0,55	1,50
4	0,10	0,50	0,59	0,31	1,98
5	0,28	0,14	0,26	0,28	0,66
6	0,10	0,49	0,74	0,60	1,70
moyenne	0,16	0,46	0,60	0,56	1,28

(1) DIN 4701 Heizungen. Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden. Berlin, DIN, 1959.

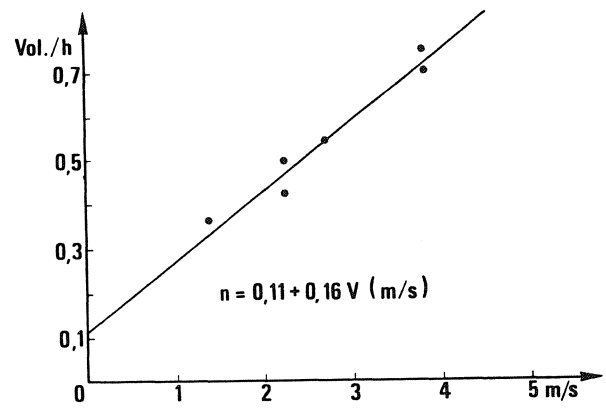


Fig. 8.

En abscisse, vitesse du vent
En ordonnée, renouvellement d'air

mais il ne faut pas oublier que pour des locaux semblables dans des maisons différentes on a mesuré des renouvellements passant du simple au décuple.

2.3 Analyse de la campagne « contamination globale »

Cette campagne a dû être réalisée dans une troisième maison (M8).

La concentration en gaz étant mesurée dans les différentes pièces, il est possible de déterminer les taux de renouvellement de chaque pièce. Ceux-ci ne sont pas représentatifs du volume d'air extérieur entrant dans la pièce (à cause des échanges internes) mais bien de la qualité de la ventilation de la pièce envisagée.

Les résultats sont repris dans le tableau 3. Il faut noter les taux de renouvellement d'air exceptionnels de la chambre 1 (0,16) et de la cuisine (1,28) comparés à ceux des autres pièces qui sont de l'ordre de 0,5.

Pour la chambre 1, il n'y a pas de raison évidente pour expliquer cette faible ventilation; des essais effectués dans d'autres maisons n'ont pas montré une telle discordance pour la chambre 1.

On peut donc supposer, soit que les caractéristiques d'étanchéité des châssis peuvent varier fortement dans une même série, soit que la mise en œuvre de ces châssis a une importance primordiale, soit que des défauts d'étanchéité autres que ceux des châssis jouent un rôle important.

En ce qui concerne la cuisine, le taux de ventilation élevé peut s'expliquer par la présence d'une porte extérieure et d'une porte vers la cave.

Le tableau 4 reprend les valeurs de renouvellement global mesurées dans les différents essais. Il n'est pas possible de trouver une corrélation entre le renouvellement global et la vitesse moyenne du vent mesurée à 5 m au-dessus du toit.

Cela est sans doute dû au fait que les conditions climatiques étaient très variables, en amplitude et en orientation au cours d'un même essai. Pendant la campagne d'essais caractérisée par une vitesse de vent faible, de l'ordre de 2 m/s, l'habitation testée présentait un taux de renouvellement d'air de l'ordre de $(0,47 \pm 0,13)$ vol./h.

2.4 Conclusions

Les essais pièce par pièce ont mis en évidence d'importantes différences dans les taux de renouvellement d'air de pièces semblables localisées dans des maisons de construction et d'architecture identiques.

Par contre, les essais en contamination globale montrent que là où, dans un même logement, la méthode de la norme DIN 4701 donne des prédéterminations satisfaisantes par rapport aux mesures, certaines pièces peuvent être ventilées très différemment les unes des autres.

Cependant, les mêmes discordances n'ayant pas été constatées dans l'ensemble des logements, nous pouvons supposer que les caractéristiques d'étanchéité à l'air des châssis et de leur placement, et même l'étanchéité globale à l'air du logement, sont à l'origine des discordances.

Il semble finalement que les variations d'amplitudes et de fréquences, pour une même vitesse moyenne du vent, ainsi que les différentes orientations obtenues au cours des essais,

soient responsables du manque de corrélation entre le renouvellement d'air global et la vitesse météorologique moyenne du vent.

3. MESURE DE LA VENTILATION D'UNE MAISON INDIVIDUELLE - DEUXIEME CAMPAGNE DE MESURES

3.1 Description de la campagne

Une seule maison a été testée par la méthode de la contamination globale. Il s'agit d'une maison unifamiliale située dans un site bien dégagé. Elle comporte un seul niveau habitable dont le volume est de 325 m^3 (fig. 9). Elle est normalement chauffée par une pompe à chaleur air - air et comporte donc un réseau de gaines de pulsion et de reprise d'air.

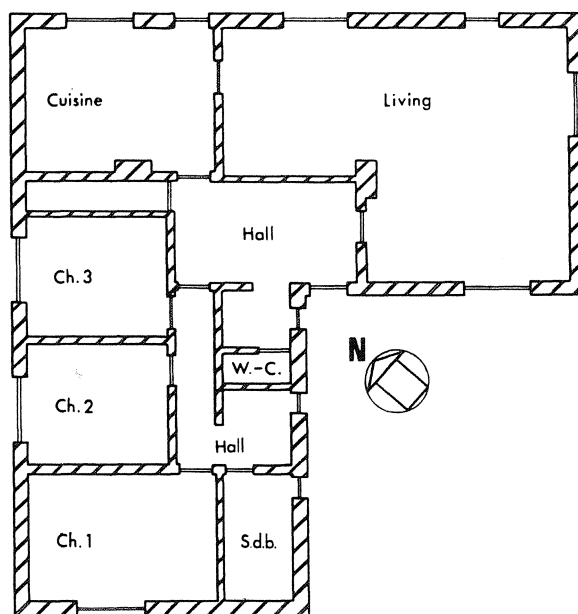


Fig. 9.

En plus des mesures du taux de renouvellement, nous avons effectué des mesures de pressions superficielles au centre des six parois extérieures (fig. 9). La pression de référence était la pression régnant dans une des pièces de l'habitation (cuisine).

Un mât météorologique était disposé à proximité de la maison, du côté d'où viennent les vents dominants. Il comportait 7 thermistances dont deux pour les mesures de température et cinq pour les mesures de vitesses (à 1 m l'une de l'autre).

Tableau 4 — Renouvellement d'air global n_T

Essai →	1	2	3	4	5	6
n_T (vol./h)	0,51	0,68	0,46	0,36	0,32	0,50
\bar{V} (m/s)		2,5	1,9	1,7	1,0	1,6
OR.		N-NW	N	N-NW	N	N

Tableau 5 — Taux de renouvellement d'air mesurés dans la maison (vol./h). — Essais en ventilation naturelle

Pièce d'habitation \ Essai	M ₁ (1)	M ₂ (2)	M ₃	M ₄	M ₇	M ₉
Salle de bains	1,16	0,69	0,05	0,19	0,24	0,20
Chambre 1	1,31	0,60	0,07	0	0,06	0,03
Chambre 2	1,34	0,59	0,09	0	0,03	0,02
Chambre 3	—	0,50	0,12	0	0,02	0,03
Hall	1,16	0,62	0,10	0,24	0,24	0,24
Cuisine	1,16	0,43	0,02	0,25	0,24	0,23
Living (1 ^{er} poste)	1,15	0,70	0,01	0,15	0,26	0,23
Living (2 ^{ème} poste)	1,10	0,70	0,01	0,14	0,25	0,23
Moyenne (pondérée par les volumes)	1,20	0,61	0,05	0,14	0,19	0,17
Vent météorologique moyen (m/s)	4,0	7,3	3,5	2,3	4,4	4,8
Orientation	N-NW	W-SW	W-NW	W-SW	W-NW	W
(1) Bouches de pulsion découvertes						
(2) Bouches de pulsion découvertes et ventilateur en fonctionnement.						

3.2 Taux de renouvellement d'air

Six essais de renouvellement d'air ont été effectués. Les résultats sont repris dans le tableau 5. Les essais M1 et M2 sont particuliers. Ils ont été réalisés avec les bouches de pulsion d'air découvertes, le ventilateur de pulsion étant respectivement arrêté ou en marche. On constate l'importance de ces bouches par rapport aux autres essais. Le défaut d'étanchéité se situe vraisemblablement au niveau de la pompe qui se trouve dans la cave en communication directe avec le garage dont la porte était très peu étanche. La mise en route du ventilateur diminue le défaut d'étanchéité car, dans ce cas, le circuit d'air est refermé sur lui-même (en ce qui concerne les pressions) et les infiltrations incontrôlées diminuent.

Pour les autres cas, les infiltrations naturelles sont effectivement réduites au minimum pratiquement réalisable. Ces infiltrations augmentent évidemment avec la vitesse du vent mé-

téorologique mais le nombre restreint et la discussion des résultats ne permettent pas de dégager des lois très significatives. Les infiltrations et surtout leur répartition dans le bâtiment sont aussi très affectées par l'orientation du vent.

3.3 Pressions dynamiques et microclimat extérieur

Les mesures de pression à l'intérieur des différentes pièces n'ont pas fait apparaître de déséquilibre significatif, en raison notamment des ouvertures ménagées dans le bas des portes. On peut considérer les pertes de charge intérieures comme pratiquement négligeables. Il en résulte que la pression de référence prise dans la cuisine est valable pour toute l'habitation.

La figure 10 montre un exemple de relevé des pressions superficielles sur les façades. On constate l'importance des fluctuations rapides et la quasi-impossibilité d'interpréter, tout au

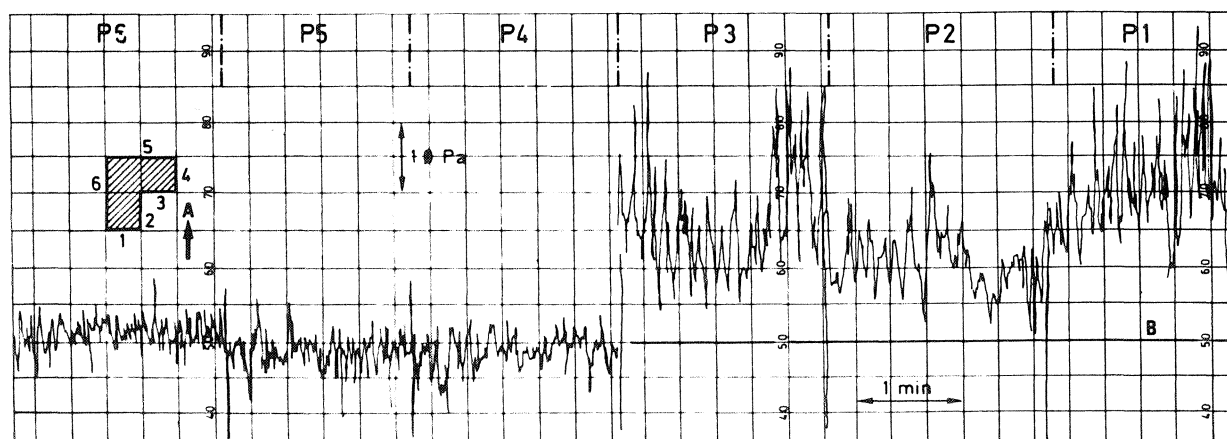


Fig. 10 — Enregistrement des pressions superficielles sur les façades.
A : vent météorologique 8 m/s B : zéro

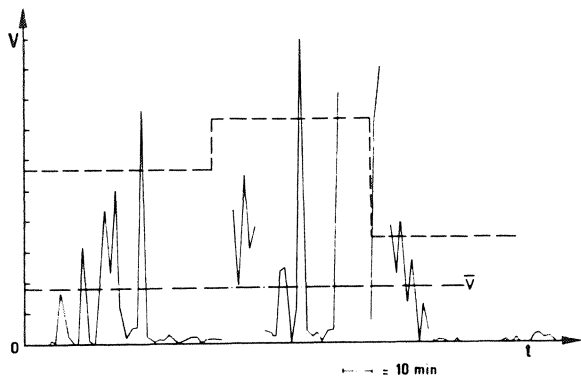


Fig. 11 — Enregistrement du vent météorologique.
 \bar{V} : vitesse moyenne

long d'un essai, le relevé de la pression instantanée. Il faudrait recourir à des mesures plus élaborées telles que valeur moyenne et efficace. En effet, il paraît illusoire de rechercher une interprétation statique du phénomène; les oscillations induisent sans doute des infiltrations nettement supérieures à celles qui correspondraient aux mesures moyennes en écoulement stationnaire. D'autre part, les contrôles effectués sur le microclimat montrent que la définition du vent météorologique ne suffit pas. La figure 11 illustre le comportement du vent près de la maison à 5 m de hauteur. Le vent moyen n'est même pas conservé à proximité de l'habitation (tableau 6) et de plus, il s'y superpose des oscillations temporelles importantes.

4. MESURE DE LA VENTILATION ET DE L'ETANCHEITE A L'AIR DE TROIS LOGEMENTS SOCIAUX (1)

4.1 Introduction

Au cours d'une campagne de mesures effectuées dans trois maisons sociales identiques, on s'est intéressé :

- à l'étanchéité à l'air des menuiseries extérieures (portes, fenêtres et portes-fenêtres)
- à la conformité de la perméabilité à l'air de ces menuiseries extérieures aux normes belges existantes
- à la part prise par la perméabilité de ces menuiseries dans les taux de renouvellement d'air mesurés à l'aide d'un gaz traqueur.

L'implantation et la numérotation (qui servira de repère dans la suite de ce texte) des trois maisons étudiées sont reprises à la figure 12; on y a mesuré non seulement les taux de ventilation dus aux infiltrations d'air, mais également ceux obtenus à l'aide d'un système mécanique contrôlé que l'on avait réalisé dans l'espoir de voir se réduire l'effet des infiltrations sauvages, surtout en ce qui concerne le système à double flux avec un excédent d'insufflation par rapport à l'extraction.

(1) Voir bibliographie n° 1.

(2) NBN B 62-001 Hygrométrie des bâtiments. Isolation thermique. Conditions hivernales. Bruxelles, IBN, 1974.

Tableau 6 — Profils de vitesse de vent

Altitude (m)	Vitesse moyenne et déviation standard (m/s)	
	1	0,2 ± 0,5
2	—	0,4 ± 1,2
3	1,2 ± 1,6	0,6 ± 0,6
4	2,0 ± 2,8	2,4 ± 2,6
5	1,8 ± 2,5	3,8 ± 5,2
vent météo (m/s)	5,9 S-SW	10,3 NW

La norme belge qui fixe la perméabilité à l'air des fenêtres extérieures est la norme NBN B 62-001 (2), élaborée en vue de définir le confort et de réduire la consommation d'énergie d'un bâtiment en conditions hivernales. Afin de satisfaire à cette norme, la perméabilité à l'air des menuiseries extérieures doit répondre à la prescription suivante, laquelle est définie suivant le site où sont implantées les trois maisons étudiées :

site protégé $Q_{100} \leq 6 \text{ m}^3/\text{h.m}$

Ceci signifie que, soumis à une pression différentielle de 100 Pa, un châssis de fenêtre ne laissera s'infiltrer qu'une quantité horaire d'air extérieur de 6 m³ par unité de longueur des joints des ouvrants.

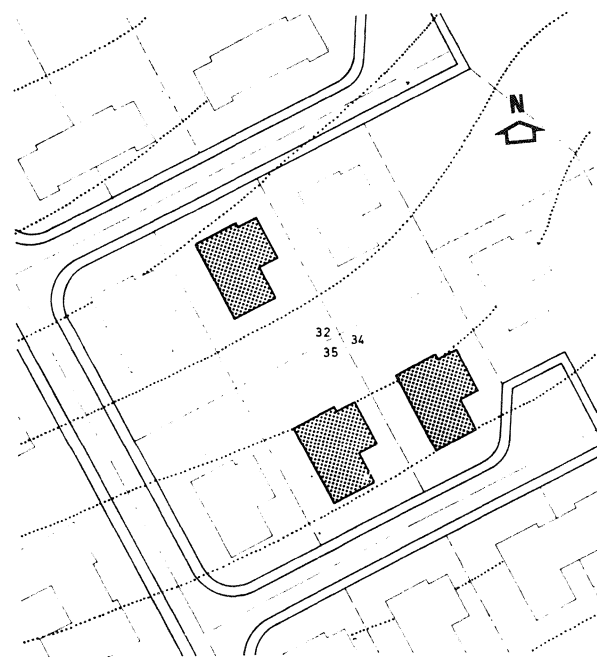


Fig. 12.

Le but du rédacteur de la norme est de réaliser un renouvellement d'air de 1,5 vol./h dans les logements équipés de ces menuiseries et ce, pour un vent moyen dont la vitesse est de 5 m/s.

4.2 Méthodes d'essais

4.21 Mesures du microclimat

Ces mesures consistent à déterminer pour le climat extérieur la température, l'humidité relative, la vitesse et l'orientation du vent :

- la température est mesurée à l'aide de thermocouples cuivre-constantan placés sous abri et avec un hygromètre à cheveu permettant également l'enregistrement de l'humidité relative
- un anémomètre à cupule de mesure de la vitesse du vent ainsi qu'un transmetteur potentiométrique de direction du vent sont placés tous deux sur un mât de 10 mètres de hauteur.

4.22 Mesure de l'étanchéité des éléments de façade

Celle-ci fut faite à l'aide d'un caisson étanche appliqué sur la face extérieure des murs. Les essais furent menés de façon à mettre l'intérieur du caisson en dépression ou en surpression.

4.23 Pression due à l'action du vent sur les façades

La pression de part et d'autre de chaque élément de façade fut mesurée à l'aide de prises de pression raccordées à des capteurs électroniques de pression différentielle.

Ces mesures ont permis de déterminer le coefficient C donné par la relation :

$$\Delta p = C \rho \frac{v^2}{2}$$

où Δp est la pression différentielle mesurée (en Pa),

ρ est la masse volumique de l'air extérieur (en kg/m³),

v est la vitesse du vent (en m/s).

4.3 Résultats obtenus

4.31 Perméabilité à l'air des menuiseries extérieures

La numérotation des différentes menuiseries extérieures est donnée à la figure 13.

Pour chacun de ces éléments, le tableau 7 permet de comparer la perméabilité à l'air mesurée avec la perméabilité normalisée.

Jusqu'à une pression différentielle de 100 Pa, la perméabilité mesurée en dépression ne fut pas sensiblement différente de celle obtenue en surpression. On constate que dans la plupart des cas, la perméabilité mesurée est de loin supérieure à la perméabilité tolérée par la norme; on en conclut dès lors que les trois maisons étudiées sont équipées de châssis et de portes dont l'étanchéité à l'air est mauvaise vis-à-vis de la norme.

4.32 Pression due à l'action du vent sur les façades

Seuls les vents soufflant du secteur SUD-OUEST et du secteur EST seront envisagés ici.

Les essais ont permis de calculer les coefficients de pression dynamique C au droit des

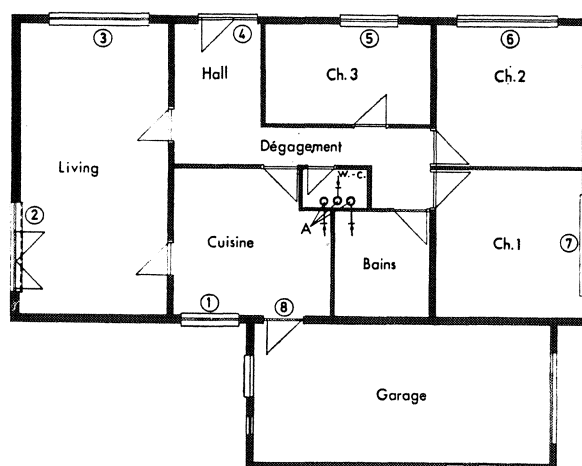


Fig. 13.

1 - 8 : éléments des façades
A : conduits de ventilation « naturelle »

Tableau 7 — Perméabilité à l'air mesurée in situ et normalisée (m³/h)

N° des éléments		1	2	3	4	5	6	7
Suivant norme NBN B 62-001		20	60	40	36	20	40	40
Mesures in situ	maison 32	35	125	64	1470	18	47	70
	maison 34	15	97	54	286	31	32	95
	maison 35	22	140	50	298	22	92	47

Tableau 10 — Quantités d'air entrant

Maison n°	SUD-OUEST - 5 m/s		EST - 2 m/s	
	air entrant par les fenêtres (vol./h)	air entrant globalement (vol./h)	air entrant par les fenêtres (vol./h)	air entrant globalement (vol./h)
32	0,04	0,45	pas mesuré	pas mesuré
34	0,19	—	négligeable	0,2
35	0,24	0,73	négligeable	0,35

4.4 Résultats obtenus à l'aide d'une installation de ventilation mécanique contrôlée - double flux (VMC - DF)

Cette installation avait pour tâche d'extraire l'air vicié produit dans les locaux de service (cuisine, salle de bains, W.-C.) et d'insuffler de l'air extérieur frais dans les locaux de séjour (living, hall, chambre à coucher).

Les quantités d'air frais insufflées correspondent approximativement à un taux de renouvellement d'air de 1 vol./h et sont supérieures de 20 % aux quantités d'air vicié extraites; on peut considérer que dans ces conditions, l'intérieur de l'habitation est en légère surpression.

La figure 15 reprend les principaux résultats obtenus dans la maison 35. On constate que les quantités d'air insufflées par la VMC - DF se superposent à celles d'air entrant sous l'effet du tirage thermique et sous l'effet des coups de vent sur l'enveloppe extérieure du bâtiment.

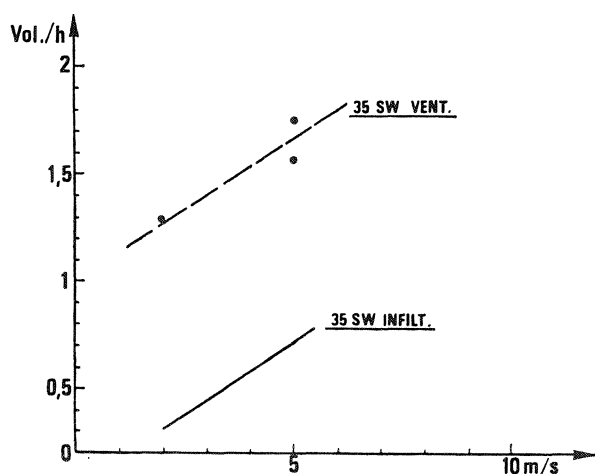


Fig. 15.

En abscisse, vitesse du vent
En ordonnée, renouvellement d'air

4.5 Conclusions

4.51 L'étanchéité à l'air des châssis et portes extérieures n'est pas satisfaisante si l'on prend comme référence les valeurs imposées par la norme.

Malgré cela, on constate cependant que pour des vents moyens de 5 m/s, les taux de renou-

vellement d'air obtenus sont compris entre les deux valeurs extrêmes de 0,45 et 0,7 vol./h; nous sommes loin d'atteindre la valeur de 1,5 vol./h considérée comme nécessaire par le rédacteur de la norme. On constate là une incohérence certaine entre les perméabilités à l'air tolérées et les performances désirées.

4.52 Même pour des maisons identiques construites en série sur le même site, les caractéristiques d'étanchéité à l'air des menuiseries extérieures et de leur placement peuvent être totalement différentes d'une maison à l'autre; il ressort bien sûr de cette constatation que l'on ne pourra jamais faire d'hypothèses valables sur la ventilation d'un bâtiment à partir de valeurs normalisées ni à partir d'essais effectués sur un autre bâtiment, même si celui-ci est identique au premier.

Dans ces conditions, le problème de l'estimation de la ventilation d'une habitation et de la consommation d'énergie y afférente reste entier.

4.53 Nos essais semblent mettre en évidence que la perméabilité à l'air des menuiseries extérieures et le placement de celles-ci ne sont responsables que d'une très faible part des infiltrations globales de l'habitation; nous rappelons à ce sujet que le pourcentage maximum atteint dans nos essais était de 32,9 %. Il est temps, nous semble-t-il, de faire comprendre à tous les corps de métier, et non plus seulement aux menuisiers, que la qualité de leur travail intervient pour une part non négligeable dans la ventilation d'une habitation et de là, dans les besoins d'énergie de cette habitation.

4.54 La tentative d'insérer une installation de ventilation mécanique contrôlée - double flux dans les logements étudiés n'a pas donné les résultats escomptés en ce sens que les infiltrations ne furent en rien réduites par la mise en surpression de l'habitation et que ces infiltrations, pour certains vents, sont du même ordre de grandeur que les quantités d'air insufflées par la VMC - DF.

Dès lors, cette ventilation ne deviendra réellement contrôlée et génératrice d'économie d'énergie que si l'étanchéité à l'air de l'ensemble de l'habitation (et plus seulement des menuiseries extérieures) s'améliore considérablement.

diverses fenêtres extérieures; ces coefficients C sont donnés dans le tableau 8.

En utilisant les résultats donnés dans les tableaux 7 et 8, on peut calculer les quantités d'air entrant et sortant par les fenêtres extérieures; ceci nous conduit aux résultats donnés dans le tableau 9.

Les déséquilibres constatés entre les quantités d'air entrant et d'air sortant peuvent s'expliquer :

- par la perméabilité globale à l'air des maisons, faisant qu'une quantité d'air entrant par la façade, par exemple, peut ressortir par la toiture et vice-versa
- par les coups de vent qui font qu'une quantité d'air entrant par un châssis de fenêtre ou une porte d'une pièce, peut également ressortir par le même châssis ou par la même porte sans pour cela affecter le renouvellement d'air des autres pièces.

4.33 Taux global de renouvellement d'air

Au cours des essais, on s'est efforcé de maintenir les températures intérieures aux valeurs suivantes :

- 22 °C dans les living
- 18 °C dans les cuisines et les chambres
- 24 °C dans les salles de bains
- 16 °C dans les halls d'entrée et les W.-C.

Nos résultats, portés sur un graphique (fig. 14), montrent une nette différence dans la ventilation globale des maisons 32 et 35 pour un vent soufflant du secteur SUD-OUEST.

Tableau 8

Élément n°	Coefficient de pression dynamique C	
	SUD-OUEST	EST
1	- 0,13	+ 0,05
2	- 0,09	- 0,36
3	+ 0,35	- 0,29
5	+ 0,14	- 0,29
6	0	- 0,29
7	- 0,36	- 0,29

Tableau 9 — Quantités d'air entrant et sortant

Maison n°	SUD-OUEST - 5 m/s		EST - 2 m/s	
	air entrant (vol./h)	air sortant (vol./h)	air entrant (vol./h)	air sortant (vol./h)
32	0,04	0,2	pas mesuré	pas mesuré
34	0,19	0,09	négligeable	0,1
35	0,24	0,07	négligeable	0,1

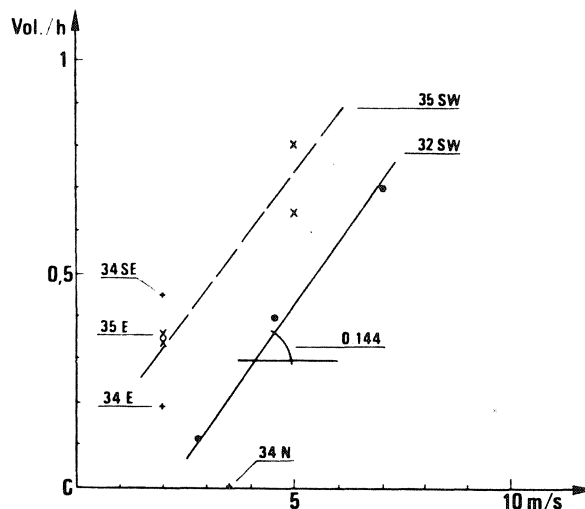


Fig. 14.
En abscisse, vitesse du vent
En ordonnée, renouvellement d'air

Malheureusement, la maison 34 n'a pu être mesurée que pour un vent soufflant du secteur EST-SUD-EST; cette maison semble cependant être sensible à l'orientation du vent et en tout cas, nettement plus sensible à ce facteur que la maison 35.

4.34 Importance de la perméabilité des châssis de fenêtre dans la ventilation globale des maisons

Nous avons comparé dans le tableau 10 les quantités d'air extérieur entrant par les fenêtres à celles qui entrent globalement dans chaque maison.

Nous constatons que la quantité d'air entrant par les fenêtres extérieures peut atteindre des valeurs comprises entre 0 % (cas d'un vent d'EST de 2 m/s et des maisons 34 et 35) à 32,9 % (cas d'un vent du secteur SUD-OUEST de 5 m/s et de la maison 35) de la quantité totale d'air entrant dans chaque maison. Si nous ne considérons que le cas le plus fréquent en Belgique, à savoir celui d'un vent soufflant du secteur SUD-OUEST à une vitesse de 5 m/s, nous constatons que la part prise par la perméabilité des fenêtres et de leur placement dans la ventilation globale de chaque maison varie de 8,9 % (maison 32) à 32,9 % (maison 35).

Bibliographie

1. ...

Circuits d'air. Economie d'énergie dans les équipements de ventilation, 2^e partie. Bruxelles, Rapport de recherche IC-IB, janvier 1979.

2. Nusgens P. et Caluwaerts P.

Determination of the ventilation rate in a series of social houses. Ventilation and infiltration in dwellings. CIB proceeding 52.

3. Uyttenbroeck, J. et Heikhaus, H.

Mesures de la consommation d'énergie dans dix maisons neuves non habitées. Bruxelles, C.S.T.C.-revue n° 1, mars 1978.

NATURAL VENTILATION IN ONE-FAMILY HOUSES

Summary

In order to reduce the energy required to heat buildings, the thermal insulation level of the envelope of new buildings has been considerably improved.

As a result the ventilation necessary for human habitation of buildings accounts for an increasingly important part of their energy consumption.

It is therefore of prime importance to have a good understanding of ventilation phenomena, and to be able to predetermine them.

Following this aim the article summarizes the results of three programmes of measurements carried out in one-family houses, which in most cases were of the « council house » type.

These three measurement programmes illustrate the different stages reached in our understanding of the phenomena.

However a lot of work remains to be done, in particular as regards the correlation between the airtightness measurements of the various components of a dwelling and the air-change rates obtained with tracer-gas measurements.

NATÜRLICHE LÜFTUNG VON EINFAMILIEN-HÄUSERN

Zusammenfassung

Um den Energiebedarf für die Heizung von Gebäuden zu verringern hat man die Wärmedämmung der Aussenseiten neuer Gebäude erheblich verbessert.

Dadurch fällt ein immer grösserer Teil des gesamten Energieverbrauchs auf die für die Menschen im Gebäude lebensnotwendige Lüftung.

Die Kenntnis und die Berechenbarkeit der Lüftungsvorgänge wird dadurch immer mehr in den Vordergrund gestellt.

Darum werden hier die wichtigsten Ergebnisse von drei Mess-Serien in Einfamilienhäusern, meist Sozialwohnungen, zusammengefasst.

Diese drei Mess-Serien zeigen die verschiedenen Etappen, die im Verständnis der Vorgänge durchlaufen wurden.

Viel Forschungsarbeit bleibt jedoch noch auszuführen, insbesondere in der Korrelation zwischen der Luftdurchlässigkeit der verschiedenen Bauteile eines Hauses und der durch Messungen mit Spurengas erhaltenen Lüfterneuerungszahl.

AIC Translation No 12

"Natural ventilation of single family houses"

Translated from the original French
"Ventilation naturelle des maisons individuelles"
CSTC Revue, March 1980, No.1, p4-16

1. P. Nusgens (1)
M. Guillaume (2)

NATURAL VENTILATION OF INDIVIDUAL HOUSES

To reduce energy requirements for the heating of buildings we have considerably improved thermal insulation of the "skin" of new buildings.

Consequently ventilation, which is required for the survival of all human beings within a building, is contributing to energy consumptions to an ever increasing degree.

It is therefore essential to know in detail, and to be able to predetermine clearly, the ventilation phenomena.

For this purpose a summary is given in this text of the most important results of three series of measurements in individual dwellings, for the most part those of the "social" type.

These three measurement series illustrate the different stages passed through in arriving at an understanding of the phenomenon.

However, a great deal of work remains to be done, more especially with regard to the correlation between the measurements of the airtightness of the different elements of a dwelling, and the measurements, carried out with a tracer gas, of air renewal rates.

1. GENERAL

1.1 Introduction

Human beings cannot live inside a building without a minimum supply of fresh air within it.

However, in view of the energy crisis which has been with us since 1973, thermal insulation of the outer skin of buildings is becoming increasingly common, and whilst energy requirements for heating these buildings are constantly falling, it is noticeable that those required for ventilation are rising steadily.

Thus it will soon be considered necessary to have a more detailed knowledge of the phenomenon of "building ventilation" in order to reduce the requirements or at least to predetermine them more accurately.

It is with this in mind that we have launched ourselves into several series of in situ measurements, the three reported on here clearly illustrating the course we have followed in attempting to understand the phenomena observed.

1.2. Laws of variation of tracer gas content in premises after injection.

1.21 Symbols

The principal symbols used in this study are given here:

q : quantity of tracer gas injected into a dwelling (m³)

r_i (r₁, r₂): rate of air renewal in premises i

t: time (h)

(1) Civil engineer, chief assistant at the Faculty of Applied Sciences, University of Liège.

(2) Civil engineer, laboratory manager, Research and Development Department, C.S.T.C.

v_i (v_1, v_2) : quantity of air entering premises i

V_i (V_1, V_2) : volume of premises i (m^3).

X_i (X_1, X_2) : concentration of tracer gas per unit of volume in premises i (% by volume).

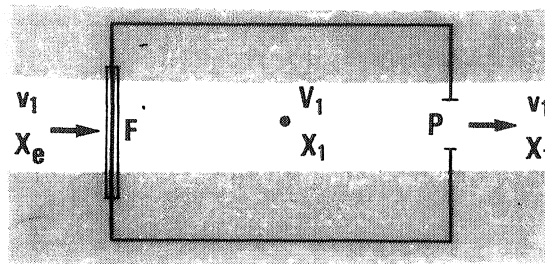
$X_{i,0}$ ($X_{1,0}, X_{2,0}$): initial concentration (% by volume).

X_e : concentration of tracer gas in the outside air (% by volume).

1.22 Case of a single dwelling

Figure 1 shows diagrammatically the case of a single dwelling comprising one outside window.

Fig. 1.
F : window
P : door



Theoretical laws

The internal equilibrium at any time is expressed by the relation:

$$V_i dX_i = v_i X_e dt - v_i X_i dt$$

$$\text{or } X_i(t) = \frac{v_1}{V_1} (X_e - X_1(t)). \quad (1)$$

We shall call $\frac{v_1}{V_1} = r_1$ the rate of air renewal.

Relation (1), put in the form:

$$X_i(t) = r_1 (X_e - X_1(t)) \quad (2)$$

is a linear non-homogeneous differential equation whose solution is:

$$X_1(t) = X_e + (X_{1,0} - X_e) e^{-r_1 t} \quad (3)$$

where $X_{1,0}$ is the value of X_1 at time 0.

Relation (3) may also be put in the form:

$$\ln(X_1(t) - X_e) = \ln(X_{1,0} - X_e) - r_1 t \quad (4)$$

if $X_{1,0} > X_e$.

or in the form:

$$\ln(X_e - X_1(t)) = \ln(X_e - X_{1,0}) - r_1 t \quad (4a)$$

if $X_{1,0} < X_e$.

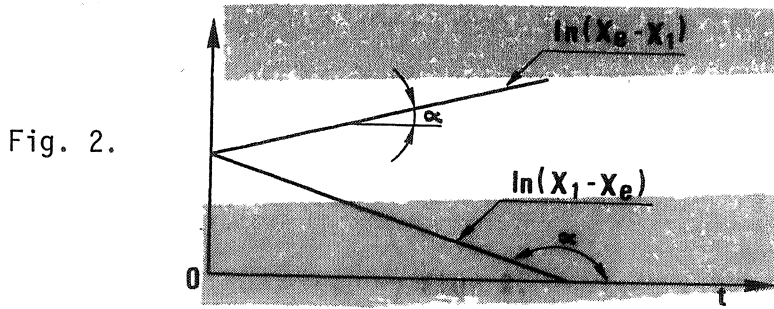


Fig. 2.

Relations (4) and (4a) plotted on a semi-logarithmic graph (fig. 2) give straight lines.

The gradient of these straight lines is $\text{tg}\alpha = -r_1$, which will be the simple means of determining the rate of air renewal r_1 .

Note

We may also obtain r_1 graphically, but less precisely, by means of relation (3), which is plotted on the graph in figure 3.

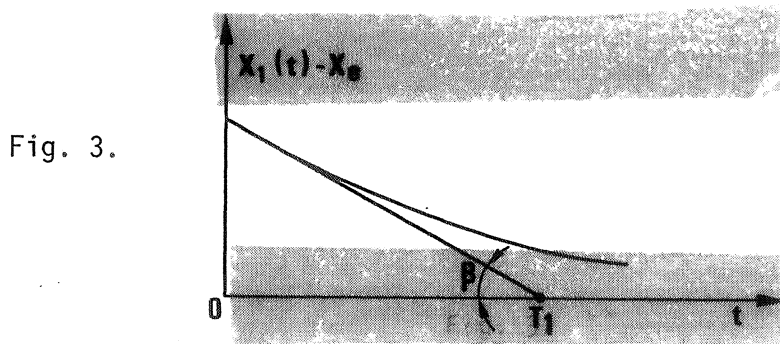


Fig. 3.

At time T_1 , the tangent to the curve will be expressed by the equation:

$$X_{1,0} - X_e = T_1 \text{tg}\beta \quad (5).$$

According to relation (2), $\text{tg}\beta$ will be equal to

$$-r_1 (X_e - X_{1,0}).$$

Therefore relation (5) gives:

$$(X_{1,0} - X_e) = -r_1 T_1 (X_e - X_{1,0}) \quad (6)$$

or, after simplifications:

$$-r_1 = \frac{1}{T_1} \quad (7)$$

This method will be less accurate than the previous method because of the inaccuracy of the plotting of the initial tangent; however, it may be used as a quick method for determining r_1 during tests.

1.23 Case of several dwellings

1.23.1. Theoretical laws for two dwellings

The simplified case of two dwellings may be represented diagrammatically according to figure 4.

We shall use the same reasoning as in paragraph 1.22 above.

For dwelling 1, the internal equilibrium gives:

$$X_1 = X_e - (X_e - X_{1,0}) e^{-r_1 t} \quad (8)$$

For dwelling 2, the internal equilibrium gives:

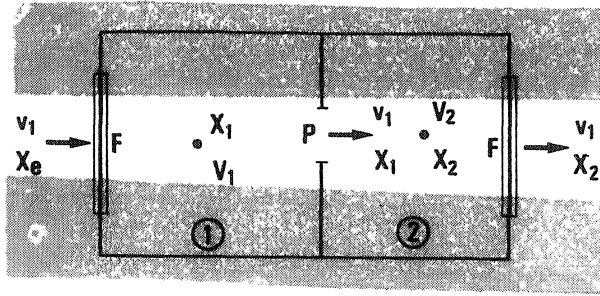


Fig. 4.
 F : windows
 P : door
 1 and 2: dwellings

$$X_2^t = \frac{v_1}{V_2} X_e - \frac{v_1}{V_2} (X_e - X_{1,0}) e^{-r_1 t} - \frac{v_1}{V_2} X_2 \quad (9)$$

By substituting:

$$X_{2,0} = \frac{V_1}{V_1 - V_2} (X_e - X_{1,0})$$

$$\text{and } r_2 = \frac{v_1}{V_2},$$

we obtain, after solving equation (9):

$$X_2 = e^{-r_2 t} r_2 X_e + X_{2,0} e^{(-2 r_2 + r_1) t} \quad (10)$$

Relation (10) enables us to find the value of the initial tangent (at $t = 0$), which is :

$$\left(\frac{dX_2}{dt} \right)_{t=0} = r_2 X_e + (-2 r_2 + r_1) X_{2,0} \quad (11)$$

a relation in which all the factors are known except r_2 .

We may therefore obtain the value for r_2 graphically by means of relation (11).

1.23.2 General case

The previous case, although simplified, produces complex results, which become even more complex when we consider the general cases of several dwellings.

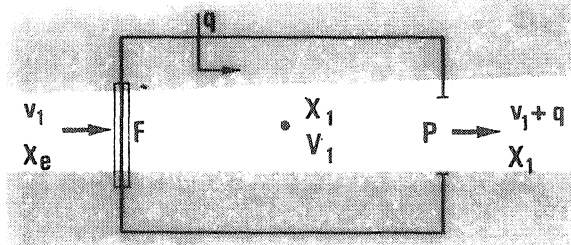


Fig. 5.
 F : window
 P : door

Here we shall merely consider the following experimental method.

The total quantity of tracer gas (for the entire dwelling) at any time t will be expressed by the relation :

$$\sum_i X_i(t) V_i = X(t) \sum_i V_i \quad (12)$$

or

$$X(t) = \frac{\sum_i X_i(t) V_i}{\sum_i V_i} \quad (13)$$

It may therefore be considered that the whole dwelling is a single premises in which the tracer gas content is $X_1(t)$, which is at all times expressed by relation (13).

Thus a semi-logarithmic graph similar to that shown in figure 2 will give a straight line whose gradient will characterise the overall rate of air renewal sought.

1.24 Other law of variation of the gas content during the injection

We shall only consider the case of a continuous injection of q constant of a tracer gas into a dwelling for a sufficient length of time.

1.24.1. General case

The descriptive diagram of the test is shown in figure 5. The internal equilibrium at any time may be expressed by the relation:

$$V_1 dX_1 = q dt + v_1 X_e dt - (v_1 + q) X_1 dt \quad (14)$$

or

$$X_1' = \frac{q}{V_1} + r_1 X_e - (r_1 + \frac{q}{V_1}) X_1, \quad (15)$$

which is a differential equation whose solution is:

$$X_1 = (X_{1,0} - \frac{q}{V_1} - r_1 X_e) e^{-(r_1 + \frac{q}{V_1})t} + (\frac{q}{V_1} + r_1 X_e). \quad (16)$$

1.24.2 Special case

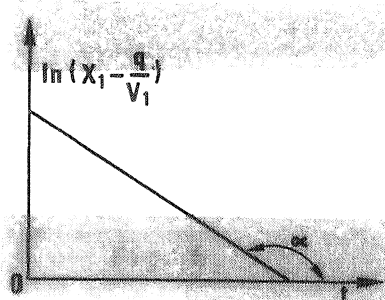
The general equation (16) will give the following where the tracer gas content of the outside air is negligible:

$$X_1 = \frac{q}{V_1} + (X_{1,0} - \frac{q}{V_1}) e^{-(r_1 + \frac{q}{V_1})t}. \quad (17)$$

Relation (17) may also be put in the form:

$$\ln(X_1 - \frac{q}{V_1}) = \ln(X_{1,0} - \frac{q}{V_1}) - (r_1 + \frac{q}{V_1}) t. \quad (18)$$

Fig. 6.



This law is plotted on the graph in figure 6.

We observe that the gradient of this straight line is equal to:

$$\operatorname{tg}\alpha = - \left(r_1 + \frac{q}{V_1} \right), \quad (19),$$

a relation in which $\frac{q}{V_1}$ is known; this constitutes a simple method of determining r_1 .

1.25 Law of reduction of the tracer gas content

This law is that obtained with most of the tracer gases used, for example SF_6 , N_2O_5 , N_2O , CO_2 and O_2 .

Later on in this paper we shall discuss test results obtained with CO_2 , N_2O and O_2 .

The injection of the tracer gas enables an initial content $X_{1,0}$, in relation (4) above, to be reached in the dwelling, because in this case the initial content $X_{1,0}$ is higher than the content X_8 of the outside air.

A measurement of the reduction in the content of this gas in the dwelling will enable a graph similar to that in figure to be drawn, and the rate of air renewal sought finally to be obtained.

If the tracer gas used is not present in the outside air (this is the case, for example, with SF_6), relation (3) explained above is simplified and becomes:

$$X_1(t) = X_{1,0} e^{-r_1 t}. \quad (20)$$

In this case, it is always the gradient of the straight line in the semi-logarithmic graph in figure 2 that will give the rate of air renewal sought.

1.26 Law of increase in the tracer gas content

This is the law obtained when the tracer gas used is oxygen (O_2).

In this case, a large injection of nitrogen (N_2) will reduce the O_2 content in the air inside the dwelling to a value $X_{1,0}$, used in relation (4a), because in this case, $X_{1,0}$ is lower than content $X_{1,0}$ of the outside air. A measurement of the increase in O_2 content in the dwelling will enable a graph similar to that in figure 2 to be drawn, and the rate of air renewal sought finally to be obtained.

1.3 Measurement principle

1.31. Instrumentation

1.31.1 Tracer gas: N_2O or CO_2

In this case, the measuring device is a gas analyser with selective absorption in infrared light.

The measurement principle is as follows: the measuring cell is divided into two identical enclosures containing CO_2 or N_2O .

These two enclosures receive infrared radiation which has previously passed through a control cell containing no tracer gas, and an analysis cell through which the gas to be analysed passes; the gas to be analysed absorbs some of the radiation in proportion to the tracer gas content, and this results in a different rate of heating in the two measuring enclosures. The difference in temperature thus created leads to a difference in pressure between the two enclosures which, when converted to an electric value, supplies the measuring signal.

1.31.2 Tracer gas: O_2

In this case, the measuring instrument is a gas analyser based on the paramag-

netic properties of oxygen and on the dependence of these properties on temperature. In fact, the paramagnetism of the oxygen reduces as its temperature increases.

In a measuring cell, the gas to be analysed is subjected to a large magnetic field created by a permanent magnet, between whose poles a filament heats the gas with which it is put in contact.

Since the magnetic field has a tendency to attract the cold gas, and repel the hot gas, what is in effect a magnetic wind is created in the measuring cell, and the speed of this wind depends on the oxygen content of the gas analysed.

The heating filament is made from a material whose strength varies considerably according to temperature; the magnetic wind will have the effect of cooling the filament and varying its resistance.

This filament is inserted in a Wheatstone bridge whose imbalance will serve to measure the speed of the magnetic wind and therefore the oxygen content of the gas to be analysed.

1.32 Tracer gas injection principle

In a dwelling, certain rooms are ventilated by the outside air, and others by the air deriving from neighbouring rooms.

From the energy point of view, only the total flow of outside air is of any interest, which is why it was decided, for the tests reported on here, to carry out tests with contamination of the whole dwelling.

The gas (tracer in the case of CO_2 or N_2O , nitrogen in the case of oxygen), is injected for about ten minutes, whilst all the air in the dwelling is thoroughly mixed by means of fans; during this injection, all the inside doors are open, and in each room the fans distribute the contaminant.

Once the injection is complete, the fans are set to their minimum speeds to simulate mechanically, if the dwelling is not heated during the tests, mixing of the air similar to that which would have been produced by a heat source. When the tests are carried out in a heated dwelling, the heating system is sufficient to obtain a perfect mixture of the contaminant and the ambient air.

2. MEASUREMENT OF THE VENTILATION OF INDIVIDUAL DWELLINGS - FIRST SERIES OR MEASUREMENTS

2.1 Description of the measurement series

As part of an investigation into the actual fuel consumption required to heat dwellings, a series of natural ventilation measurements was carried out (1). The 3 houses tested form part of a development of social dwellings of traditional construction (fig. 7). (It should be noted that only the front and rear facades are provided with openings). Two houses (M3 and M7) were tested by the contamination method, room by room. House M8 was studied by the global contamination method.

2.2 Analysis of the measurement series, room by room.

During this series of measurements, house M8 was studied in detail to obtain results in different climatological situations (26 tests). Some control tests (one per room) were carried out in house M3, and in table 1 are summarised the results obtained in the two houses for fairly similar, but certainly not identical, climatic conditions. This may explain the slight differences that can be observed in most of the rooms except the living room and room 3.

1) See bibliography no. 3.

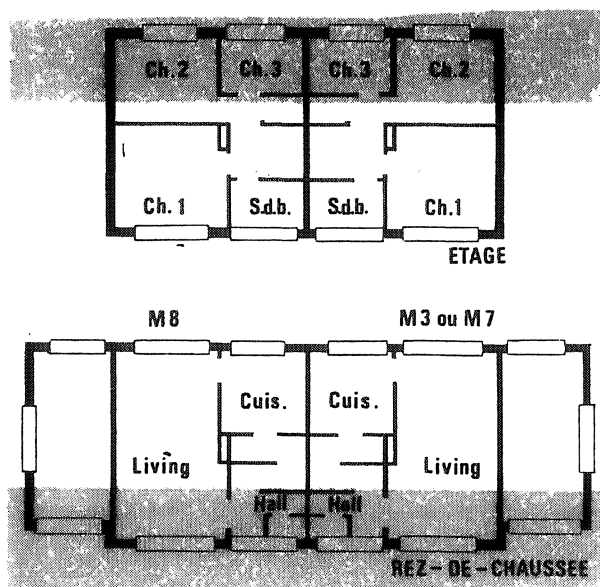


Fig. 7.

Key

Ch. = room.

S.d.b. = bathroom.

ETAGE = 1st FLOOR

Cuis. = kitchen

REZ-DE-CHAUSSEE - ground floor.

Living = living room

Hall = hall

In fact, for the living room, with fairly similar wind directions, the following is observed:

- for house 3, a renewal rate of 0.3 vol./h, with a wind speed of approximately 6 m/s
- for house 7, a renewal rate of 0.8 vol./h, with a wind speed of approximately 4 m/s.

The situation is even more serious for room 3, because under very similar climatic conditions, house 7 shows a renewal rate of 3.8 vols/h, i.e. almost ten times that of house 3.

The systematic measurements taken in the different rooms in house 7 do not generally enable a relationship to be established between the rate of renewal and wind speed.

This is due to the difficulty in obtaining a sufficient range of measurements for both speed and direction.

It was only possible to obtain a valid relationship for the living room (fig.8), which has openings (doors and windows) on two opposite walls, and which is therefore less sensitive to the direction of the wind.

For this house, a law is obtained:

$$n(\text{vol./h}) = 0.11 + 0.16 V,$$

V being the speed of the wind measured at a meteorological site (10 m in height) at the nearest station (approximately 10 km).

On the other hand, the different tests carried out enable the renewal rates to be estimated for a meteorological wind speed of 4 m/s.

They are recorded in table 2 and are compared with the rates calculated according to standard DIN 4701 (1).

(1) DIN 4701. Heating systems. Rules for calculating the heat requirement of buildings. Berlin, DIN 1959.

Table 1


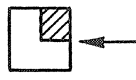

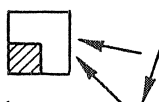
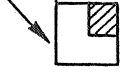
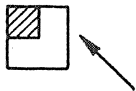
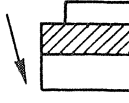
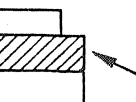
Test No.	Place	Wind (m/s)	Rate (vol./h)	Direction
2	M3. CH1	2,0	0,5	
13	M7. CH1	2,4	0,3	
3	M3. CH3	5,0	0,4	
23	M7. CH3	5,6	3,8	
4	M3. CH2	3,9	1,7	
17	M7. CH2	4,9	1,8	
5	M3. Liv.	6,0	0,3	
7	M7. Liv.	3,9	0,8	

Table 2

Place	n to DIN 4701 (vol.h)	n estimated (vol.h)
Living room	0.2	0.7
Kitchen	1.7	1.1
Room 1	0.5	0.7
Room 2	1.0	0.9-1.9
Room 3	1.9	2.2

With the exception of the living room, satisfactory agreement is observed between the calculated values and those deduced from in situ tests, but it must not be forgotten that for similar locations in different houses renewals have been measured which range from the single unit to ten times that.

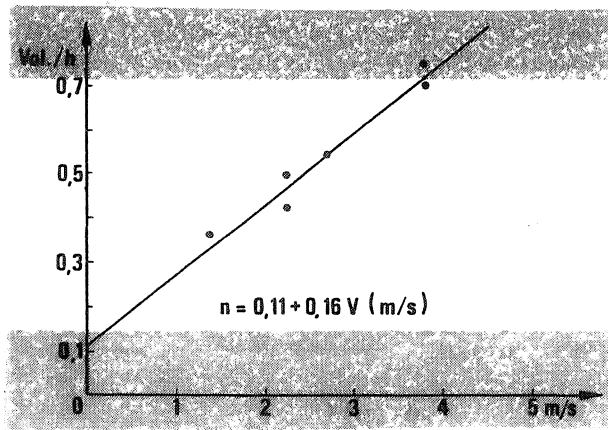


Fig. 8.

X-axis, wind speed
Y-axis, air renewal

2.3 Analysis of the "general contamination" series of measurements

This series of measurements had to be carried out in a third house (M8).

Since the gas concentration was measured in the different rooms, it is possible to determine the rates of renewal for each room. These are not representative of the volume of outside air entering the room (due to internal exchanges), but rather of the quality of the ventilation of the room considered.

The results are contained in table 3. Note should be taken of the exceptional air renewal rates recorded in room 1 (0.16) and the kitchen (1.28) compared with those in the other rooms, which are of the order of 0.5.

For room 1, there is no obvious reason to explain this low ventilation; tests carried out in other houses did not show any such discrepancy for room 1.

Table 3 - Air renewal rate (vol./h).

Place / Test	Room 1 SW	Room 2 NE	Room 3 NE	Living room SW-NE	Kitchen NE
1	0.12	0.52	0.61	0.72	0.81
2	0.22	0.57	0.77	0.90	1.04
3	0.14	0.51	0.59	0.55	1.50
4	0.10	0.50	0.59	0.31	1.98
5	0.28	0.14	0.26	0.28	0.66
6	0.10	0.49	0.74	0.60	1.70
average	0.16	0.46	0.60	0.56	1.28

It may therefore be assumed either that the tightness properties of the frames may vary considerably in the same series, or that the arrangement of these frames is of vital importance, or finally that tightness defects other than those in the frames play an important part.

As far as the kitchen is concerned, the high ventilation (air renewal) rate may be explained by the presence of an outer door and a door to the cellar.

Table 4 contains the overall renewal values measured in the different tests. It is not possible to find any correlation between the overall renewal and the average speed of the wind measured 5 m above the roof.

This is doubtless due to the fact that the climatic conditions were highly variable, both in amplitude and direction, during the same test. During the series of tests characterised by a low wind speed, of the order of 2 m/s, the dwelling tested showed a renewal rate of the order of (0.47 ± 0.13) vol./h.

2.4. Conclusions

The tests carried out room by room indicated considerable differences in the

air renewal rates of similar rooms located in houses of identical structure and architecture.

On the other hand, the general contamination tests show that where the method in standard DIN 4701 gives satisfactory predeterminations in relation to the measurements, in the same dwelling, some rooms may be ventilated very differently from others.

However, since the same discrepancies were not observed in all the dwellings, we may assume that the airtightness properties of the frames and their position or arrangement, and even the overall airtightness in the dwelling, are the cause of the discrepancies.

Finally, it appears that the variations in amplitudes and frequencies, for the same average wind speed, as well as different directions observed during the tests, are responsible for the lack of correlation between the overall renewal rate and the average meteorological wind speed.

3. MEASUREMENT OF VENTILATION IN AN INDIVIDUAL HOUSE - SECOND MEASUREMENT SERIES

3.1 Description of the measurement series

A single house was tested by the general contamination method. This was a single family house situated in an isolated situation. It comprises only one living level, whose volume is 325 m³ (fig. 9). It is normally heated by an air-air heating pump, and therefore has a network of air circulation recycling ducts.

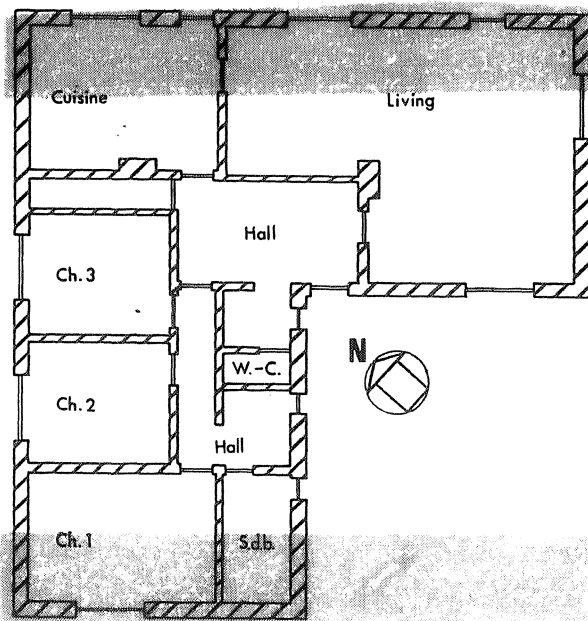


Fig. 9.

In addition to the renewal rate measurements, we carried out surface pressure measurements at the centre of the six outside walls (fig. 9). The reference pressure was the pressure prevailing in one of the rooms in the dwelling (kitchen).

A meteorological mast was erected close to the house, on the side receiving the prevailing winds. It comprised 7 thermistors, two for temperature measurements and five for the speed measurements (1 m between).

Table 4 - Overall air renewal n_T

Test	1	2	3	4	5	6
n_T (vol./h)	0.51	0.68	0.46	0.36	0.32.	0.50
\bar{V} (m/s)		2.5	1.9	1.7	1.0	1.6
\overline{OR}		N-NW	N	N-NW	N	N

Table 5 - Air renewal rates measured in the house (vol./h.) - Tests in natural ventilation.

Room in house \ Test	M_1 (1)	M_2 (2)	M_3	M_4	M_7	M_9
Bath room	1.16	0.69	0.05	0.19	0.24	0.20
Room 1	1.31	0.60	0.07	0	0.06	0.03
Room 2	1.34	0.59	0.09	0	0.03	0.02
Room 3	-	0.50	0.12	0	0.02	0.03
Hall	1.16	0.62	0.10	0.24	0.24	0.24
Kitchen	1.16	0.43	0.02	0.25	0.24	0.23
Living room (1st station)	1.15	0.70	0.01	0.15	0.26	0.23
Living room (2nd station)	1.10	0.70	0.01	0.14	0.25	0.23
Average (weighted by volumes)	1.20	0.61	0.05	0.14	0.19	0.17
Average meteorological wind (m/s)	4.0	7.3	3.5	2.3	4.4	4.8
Direction	N-NW	W-SW	W-NW	W-SW	W-NW	W
(1) Uncovered air circulation vents						
(2) Uncovered air circulation vents and fan operating.						

3.2. Air renewal rates

Six air renewal tests were carried out. The results are given in table 5. The tests for M_1 and M_2 are of special interest, and were carried out with the air circulation vents uncovered, the circulation fan being off and on respectively. The importance of these vents can be seen in relation to the other tests. The airtightness defect is probably located at the pump which is installed in the cellar. (basement), directly communicating with the garage, whose door was not very airtight. Switching on the fan lessens the tightness defect because in this case the draught of air is thrust back on itself (as far as pressures are concerned), and uncontrolled ingresses are reduced.

In the other cases, the natural ingresses (infiltrations) are effectively minimized as far as practically possible. These infiltrations obviously increase with the speed of the meteorological wind, but the limited number and interpretations of the results do not enable any significant laws to be established. The infiltrations, and particularly their distribution throughout the building, are also very sensitive to wind direction.

3.3. Dynamic pressures and outside microclimate

The pressure measurements inside the different rooms indicated no significant imbalance, notably because of the gaps left at the bottom of the doors. Inner losses of head may be considered practically negligible.

As a result, the reference pressure measured in the kitchen is valid for the entire dwelling.

Figure 10 shows a survey example of the surface pressures on the facades. The size of the rapid fluctuations will be observed, with the impossibility, almost, of interpreting the graph of the instantaneous pressure throughout the test. It would therefore be necessary to resort to more

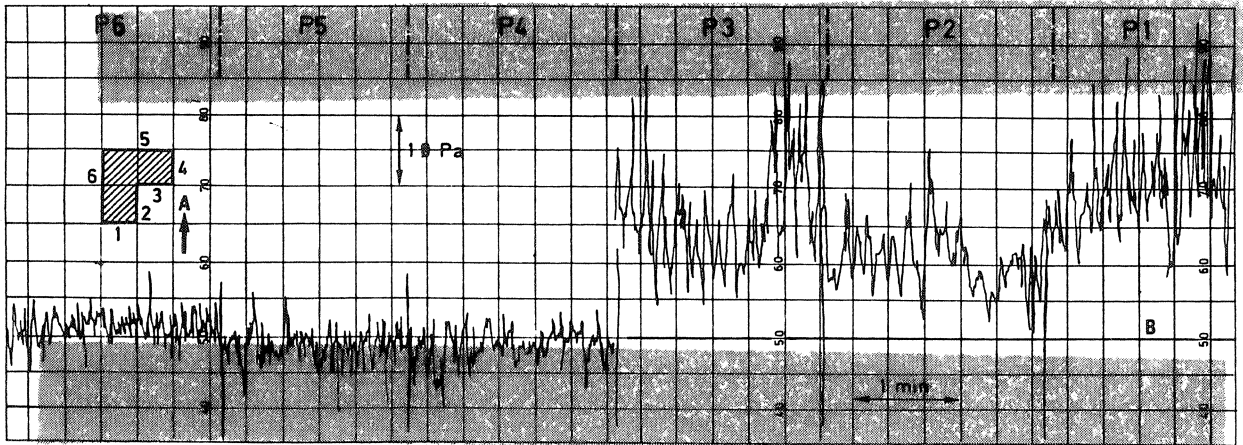
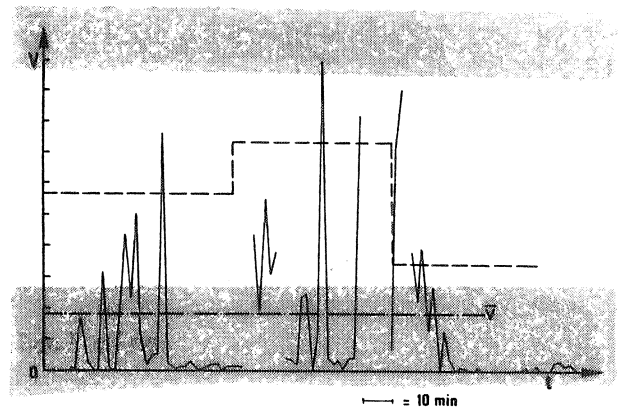


Fig. 10 - Recording of surface pressures on the facades.
A: meteorological wind 8m/s. B: zero.

Fig. 11. Recording of the meteorological wind.
 \bar{V} : average speed.



elaborate measurements such as the mean and effective values. In fact, it seems illusory to search for a static interpretation of the phenomenon; the oscillations doubtless lead to infiltrations which are clearly greater than those that would correspond to the average measurements in stationary flow. On the other hand, the inspections carried out on the microclimate show that the definition of the meteorological wind is inadequate. Figure 11 shows the behaviour of the wind near to the house at a height of 5 m. The average wind is not even maintained close to the dwelling (table 6), and in addition major time variations are superimposed on it.

4. MEASUREMENT OF THE VENTILATION AND AIRTIGHTNESS OF THREE SOCIAL DWELLINGS (1).

4.1. Introduction

1) See bibliography no. 1.

(2) NBN B 62-001. Hygrometry of buildings. Thermal insulation. Winter conditions. Brussels, IBN, 1974.

During a series of measurements carried out in three identical social dwellings, the following was studied:

- the airtightness of the external woodwork (doors, windows and French windows).
- conformity of the air permeability of this external woodwork with the existing Belgian standards.
- the contribution made by the permeability of this woodwork to the air renewal rates measured by means of a tracer gas.

The marking out and numbering (which will serve as a reference in the remainder of this paper) of the three houses studied are shown in figure 12. Here not only the rates of ventilation due to the air infiltrations were measured, but also those obtained using a controlled mechanical system which had been provided in the hope of seeing the effect of the random infiltrations reduced, particularly the double flow system, with excess inflow in relation to extraction.

Table 6 - Wind speed profiles

Altitude (m)	Average speed and standard deviation (m/s)	
1	0.2 ± 0.5	0.4 ± 0.5
2	-	0.4 ± 1.2
3	1.2 ± 1.6	0.6 ± 0.6
4	2.0 ± 2.8	2.4 ± 2.6
5	1.8 ± 2.5	3.8 ± 5.2
Meteo. wind m/s 5.9 S-SW		10.3 NW

The Belgian standard which establishes the air permeability (airtightness) of outside windows is the standard NBN B 62-001 (2), drawn up to define the degree of comfort and reduce the energy consumption of a building in winter conditions. In order to comply with this standard, the airtightness of the outside woodwork must adhere to the following law, which is defined according to the site on which the three houses studied are marked out:

$$\text{protected site } Q_{100} \leq 6 \text{ m}^3/\text{h.m.}$$

This means that, when subjected to a differential pressure of 100 Pa, a window frame will only be infiltrated by an hourly quantity of outside air of 6 m³ per unit of length of the joints of the window or door leaves.

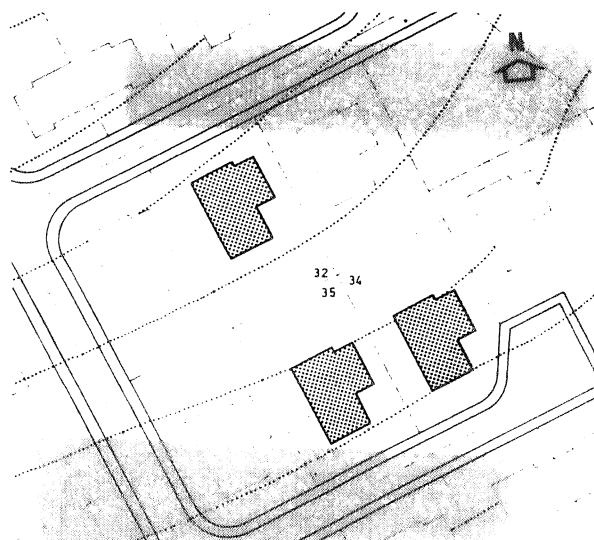


Fig. 12.

The aim of the author of the standard was to achieve an air renewal of 1.5 vol./h in dwellings equipped with this type of carpentry, for an average wind whose speed is 5 m/s.

4.2. Test methods

4.21 Measurements of the microclimate

These measurements consist in determine for the outside climate the temperature, relative humidity, speed and direction of the wind :

- the temperature is measured by means of copper-constantan thermocouples placed under a shelter and with a hair hygrometer, which also enables the relative humidity to be recorded
- a cup anemometer for measuring the wind speed, together with a potentiometric wind direction transmitter, are both placed under a mast 10 metres high.

4.22 Measurement of the airtightness of the facade elements

This measurement was carried out by means of an airtight box fixed to the outer face of the walls. The tests were conducted in such a way that the inside of the box was subjected to low or excess pressure.

4.23. Pressure due to the action of the wind on the facades

The pressure at various points on each element of the facade was measured by means of pressure sensors connected to electronic differential pressure recorders.

These measurements enabled the coefficient C, given by the relation:

$$\Delta p = C \rho \frac{v^2}{2} \quad \text{to be determined,}$$

where Δp is the differential pressure measured (in Pa).

ρ is the mass per unit of volume of the outside air (in kg/m³).

v is the wind speed (in m/s).

Table 7 - Airtightness measured in situ and standardised (m³/h).

No. of elements	1	2	3	4	5	6	7
To standard NBN B 62-001	20	60	40	36	20	40	40
In situ house 32	35	125	64	1470	18	47	70
measure- house 34	15	97	54	286	31	32	95
ments house 35	22	140	50	298	22	92	47

4.3 Results obtained

4.31 Airtightness of outside woodwork

The numbering of the different outside woodwork elements is shown in figure 13.

For each of these elements, table 7 enables their airtightness (permeability) measured to be compared with the standardised airtightness.

Up to a differential pressure of 100 Pa, the airtightness (permeability) measured at low pressure was not much different from that obtained in excess pressure. It is observed that in most cases, the permeability measured is far greater than the permeability permitted in the standard. The conclusion drawn from this is therefore that the three houses studied are provided with frames and doors whose airtightness is poor in relation to the standard.

4.32 Pressure due to the action of wind on the facades

Only winds blowing from the SOUTH-WEST or EAST will be considered here.

The tests enabled the coefficients of dynamic pressure C to be calculated at right angles with the various outside windows; these coefficients C are shown in table 8.

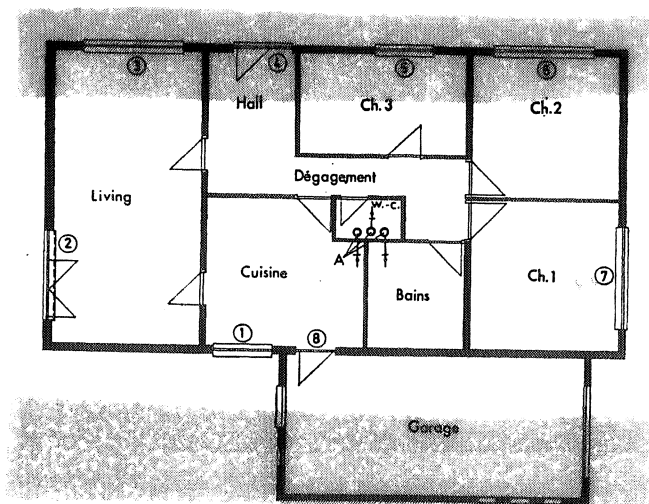


Fig. 13.

1-8: facade elements
A: "natural" vents.

Key

Ch. = room
Living = living room
Cuisine = kitchen
Bains = Bathroom
Dégagement = corridor

Using the results given in tables 7 and 8, the quantities of air entering and leaving through the outside windows may be calculated, leading to the results given in table 9.

The imbalances observed between the quantities of air entering and air escaping (incoming and outgoing air) may be explained:

- by the overall airtightness of the houses, creating a situation where a quantity of air entering via the facade, for example, may escape back through the roof and vice versa.
- by gusts of wind which cause a quantity of air entering through a window frame or a door of a room may also escape back through the same frame or through the same door without affecting the air renewal rates of the other rooms.

4.33 Overall air renewal rate

During the tests we endeavoured to maintain the inside temperatures at the following values:

- 22°C in the living rooms
- 18°C in the kitchens and bedrooms
- 24°C in the bathrooms
- 16°C in the entrance halls and WC's.

Our results, plotted on a graph (fig. 14), show a net difference in the overall ventilation of houses 32 and 35, for a wind blowing from the SOUTH-WEST direction.

Table 8

Element no.	Coefficient of dynamic pressure C	
	SOUTH-WEST	EAST
1	-0.13	+0.05
2	-0.09	-0.36
3	+0.35	-0.29
5	+0.14	-0.29
6	0	-0.29
7	-0.36	-0.29

Table 9 - Quantities of incoming and outgoing air

House no.	SOUTH-WEST - 5 m/s		EAST - 2 m/s	
	incoming air (vol./h)	outgoing air (vol./h)	incoming air (vol./h)	outgoing air (vol./h)
32	0.04	0.2	not measured	not measured
34	0.19	0.09	negligible	0.1
35	0.24	0.07	negligible	0.1

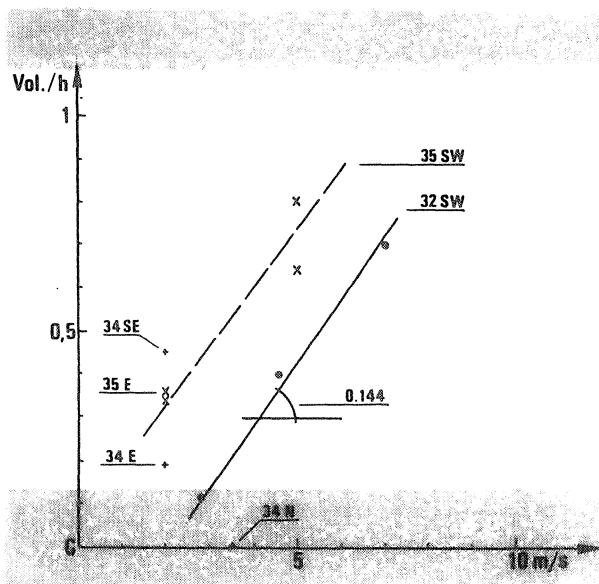


Fig. 14.
X-axis, wind speed
Y-axis, air renewal.

Unfortunately, house 34 could only be measured for a wind blowing from the EAST-SOUTH-EAST direction. However, this house appears to be sensitive to wind direction, and in any case much more sensitive to this factor than house 35.

4.34 Importance of the permeability of window frames in the overall ventilation of houses

We compared in table 10 the quantities of outside air entering through the windows with those entering generally into each house.

We observed that the quantity of air coming in through the outside windows may vary between 0% (case of an EAST wind of 2m/s, and houses 34 and 35) to 32.9% (case of a SOUTH-WEST wind of 5 m/s and house 35) of the total quantity of air entering each house. If we only consider the most common case in Belgium, that of a wind blowing from the SOUTH-WEST at a speed of 5 m/s, we observe that the contribution made by the permeability of windows and their positioning in the overall ventilation of each house varies from 8.9% (house 32) to 32.9% (house 35).

Table 10 - Quantities of incoming air

House no.	SOUTH-WEST - 5 m/s		EAST - 2 m/s	
	air coming in through the windows (vol./h)	air entering generally (vol.h)	air coming in through the windows (vol.h).	air entering generally (vol./h)
32	0.04	0.45	not measured	not measured
34	0.19	-	negligible	0.2
35	0.24	0.73	negligible	0.35

4.4 Results obtained by means of a controlled - dual flow (VMC-DF) mechanical ventilation installation

This installation was given the task of extracting spent air produced in the service areas (kitchen, bathroom, WC) and of sucking in fresh outside air into the other areas (living room, hall, bedroom).

The quantities of fresh air sucked in correspond roughly to a rate of air renewal of 1 vol./h, and are 20% higher than the quantities of spent air extracted. It may be considered that under these conditions the inside of the dwelling is subjected to slight excess pressure.

Figure 15 contains the most important results obtained in house 35. It will be seen that the quantities of air sucked in by the VMC - DF are superimposed on the quantities of air entering under the influence of the thermal draught and wind gusts on the outer skin of the building.

4.5. Conclusions

4.51 The airtightness of frames and doors (outside) is unsatisfactory if the values laid down in the standard are taken as references.

Despite this, however, it will be seen that for average winds of 5 m/s, the rates of air renewal obtained are between the two extreme values of 0.45 and 0.7 vol./h; we are far from achieving the value of 1.5 vol./h considered necessary by the author of the standard. We see here a certain discrepancy between the tolerated air permeabilities and the required performances.

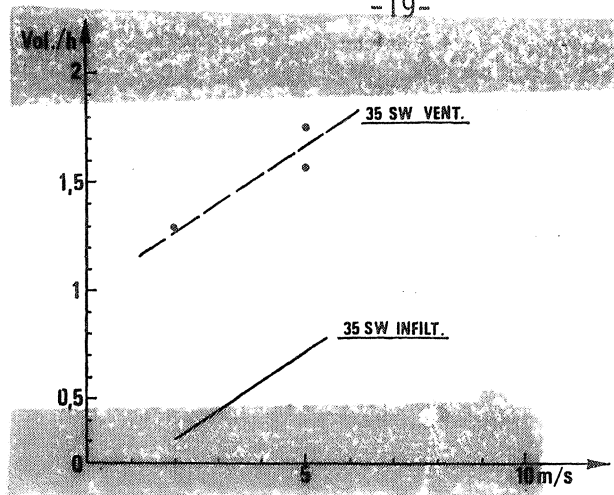


Fig. 15.

X-axis, wind speed

Y-axis, air renewal.

4.52 Even for identical houses constructed in series on the same site, the airtightness properties of the outside woodwork elements and their position may be totally different from one house to another. It is clear from this observation that valid hypotheses can never be made on the ventilation of a building on the basis of standardised values, nor on the basis of tests carried out on another building, even if this is identical to the first.

Under these conditions, the problem of estimating the ventilation of a dwelling and the energy consumption associated with the ventilation remains to be solved.

4.53 Our tests appear to show that the air permeability (tightness) of outside woodwork elements and their position are only responsible for a very low proportion of the overall infiltrations of the dwelling. We would remind readers in this connection that the maximum percentage attained in our tests was 32.9%. It is time, we think, to make all trade organisations, and not only carpenters, understand that the quality of their work has a considerable effect on the ventilation of a dwelling and hence on the energy requirements of that dwelling.

4.54 The attempt to install a controlled mechanical ventilation system - dual flow - in the dwellings studied did not produce the expected results, in the sense that the infiltrations were in no way reduced by subjecting the dwelling to excess pressure, and in that these infiltrations, for some winds, are of the same order of magnitude as the quantities of air sucked in by VMC-DF.

Thus this ventilation will not be efficiently controlled and will not generate energy savings until the airtightness of the entire dwelling (and not only the outside woodwork elements) improves considerably.

Bibliography

1. ...
Circuits d'air. Economie d'énergie dans les équipements de ventilation (Air circuits. Energy saving in ventilation equipment), 2nd part. Brussels, Research Report IC-IB, January 1979.
2. Nusgens P. and Caluwaerts P.
Determination of the ventilation rate in a series of social houses.
Ventilation and infiltration in dwellings. CIB proceeding 52.
3. Uyttenbroeck, J. and Heikhaus, H.
Mesures de la consommation d'énergie dans dix maison neuves non habitées (Measurements of the energy consumption in ten new unoccupied houses), Brussels, C.S.T.C. Review no. 1, March 1978.