

Variation de la perméabilité à l'air des fenêtres en fonction de la température extérieure Dispositif de mesure et exemples d'application

G. FLEURY et M. THOMAS

Division Procédés de Construction Légers

Service des Études de Matériaux

Sommaire

1	Objet de l'étude	1	4,23	Écarts de température entre le haut et le bas de chaque caisson	5
2	Principe de l'appareillage	1	4,24	Essai de mesure de la perméabilité à basse température	5
3	Description et mode d'emploi de l'appareillage	2	4,25	Incidence des fuites du caisson mobile	6
3,1	Caisson fixe	2	4,26	Influence de la température sur les mesures de débit	6
3,2	Caisson mobile	2			
3,3	Régulation en température	2	5	Application à l'étude de trois fenêtres en plastique	7
3,4	Régulation en pression	2	5,1	Éléments étudiés	7
3,5	Mesure des pressions	3	5,2	Modalités de l'opération	7
3,6	Mesure des débits	3	5,21	Dispositif expérimental	7
3,7	Mesure des déformations	4	5,22	Mesure de la perméabilité initiale à l'air	7
4	Mise au point de l'appareillage	4	5,23	Mesure de la perméabilité à l'air sous les conditions thermiques d'hiver	7
4,1	Essais de vérification	4	5,24	Mesure des déformations sous l'influence d'un rayonnement thermique	7
4,2	Résultats des essais	4	5,3	Présentation des résultats et conclusions	7
4,21	Températures et régulations	4			
4,22	Coefficients d'échanges superficiels	5			

RÉSUMÉ

L'article ci-après rapporte l'étude et la mise au point d'un appareillage permettant de placer une fenêtre (ou, plus généralement, un élément léger de paroi) dans des conditions variables de température reproduisant les conditions réelles d'hiver et d'été, et de déterminer la perméabilité à l'air de l'ouvrage dans ces conditions. Application du dispositif est faite à trois fenêtres en matière plastique.

SUMMARY

The following article reports on study and adjusting of a device making it possible to place a window (or more generally a light-weight cladding unit) in variable conditions of temperature, simulating real winter and summer conditions and to determine airtightness of the unit under these conditions. Three plastic window frames are tested in the device.

RESUMEN

En el siguiente artículo se informa del estudio y puesta a punto de un equipo con el que se puede colocar una ventana (o, más generalmente, un elemento ligero de muro) en condiciones variables de temperatura que reproducen las condiciones reales de invierno y de verano, y determinar la permeabilidad al aire de la obra en esas condiciones. El dispositivo se aplica a tres ventanas de plástico.

Variation de la perméabilité à l'air des fenêtres en fonction de la température extérieure

Dispositif de mesure et exemples d'application

1 Objet de l'étude

Les éléments légers de construction, par la nature et les caractéristiques des matériaux qui les constituent, répondent rapidement et fortement aux variations de température, ce qui peut se traduire par des déformations qui modifient la capacité de l'ouvrage à remplir son rôle.

On tend actuellement à fabriquer des fenêtres présentant une isolation thermique accrue. Les châssis faits de matériaux isolants ou utilisant des dispositifs d'isolation (coupure thermique) risquent particulièrement de se déformer lorsqu'ils sont soumis à deux ambiances thermiques différentes, et leur perméabilité à l'air peut s'en trouver affectée.

Le CSTB a jugé nécessaire, pour étudier ces phénomènes, de réaliser un appareillage permettant de placer des fenêtres dans les conditions de température réelles d'été et d'hiver, et de déterminer, dans cet état, les caractéristiques de ces ouvrages.

2 Principe de l'appareillage

La perméabilité à l'air d'un élément est exprimée par le débit qui traverse l'unité de surface de l'élément ($m^3/h.m^2$). Elle est fonction de la pression que l'on exerce sur sa face extérieure. La pression est exercée dans un caisson que l'on applique sur une face d'une dalle rectangulaire en béton, dans la partie centrale de laquelle est monté, de façon normale, l'élément étudié.

Le débit d'air qui traverse l'élément, est celui qui est mesuré en aspirant l'air d'un deuxième caisson, appuyé sur l'autre face de la dalle, de telle façon que la pression intérieure de ce second caisson, soit maintenue égale à la pression atmosphérique (fig. 1).

La mesure est effectuée à l'aide d'un faisceau de diaphragmes à chambres circulaires.

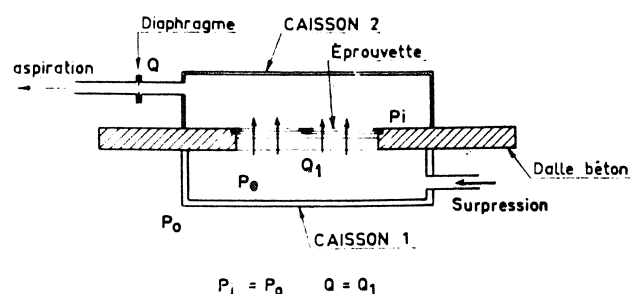


Figure 1

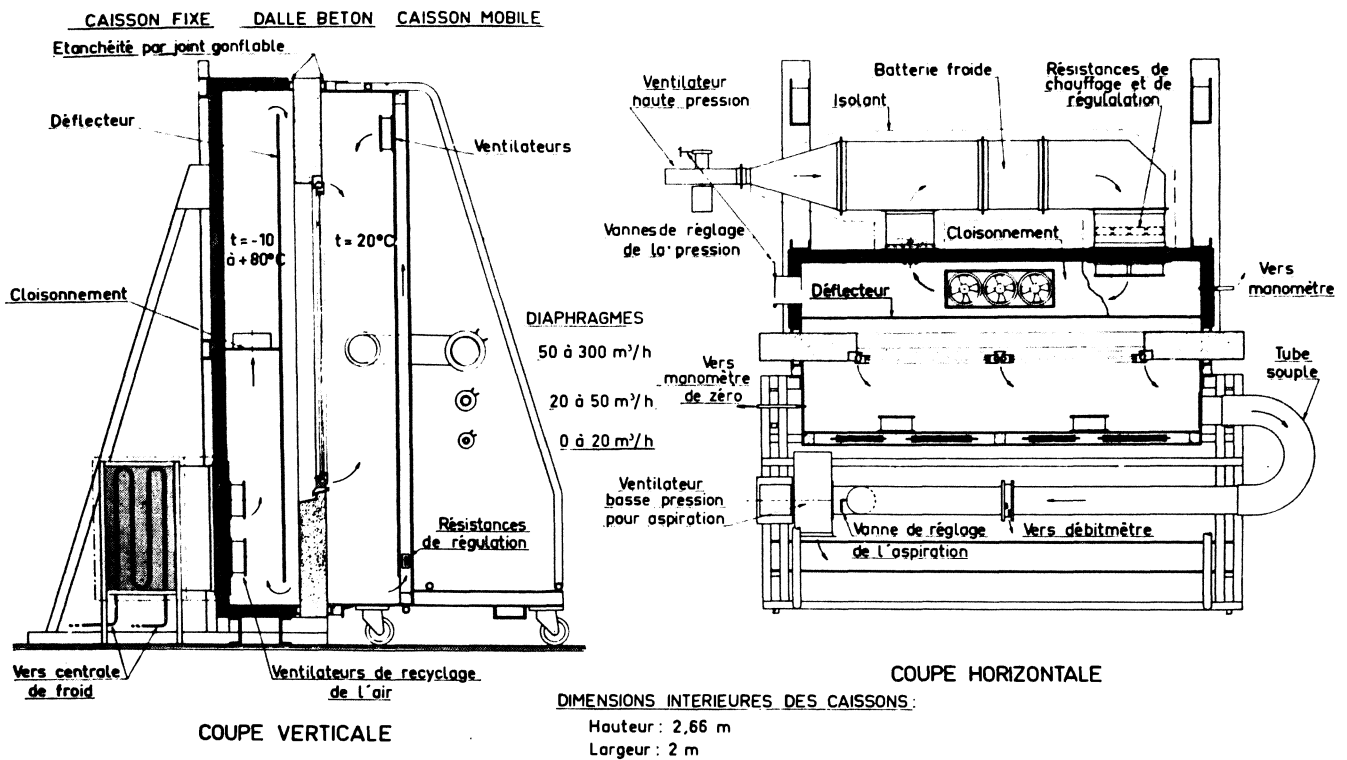


Figure 2. Appareillage d'essai de l'étanchéité à l'air des fenêtres, sous gradient de température

3 Description et mode d'emploi de l'appareillage

La figure 2 représente l'ensemble de l'appareillage d'essai. Il est constitué des deux caissons, et de la dalle porte-épreuve.

La dalle de dimensions $3,80 \times 2,80 \times 0,22$ est serrée entre les deux caissons à l'aide de serre-joints. L'étanchéité entre la dalle et les caissons est assurée par un joint gonflable.

3.1 Caisson fixe

Il est réalisé avec des panneaux isolants, sa profondeur est de 30 cm, la face ouverte mesure 200×266 cm. Une batterie de ventilation à vitesse variable fait circuler l'air autour d'un déflecteur situé à 5 cm de la face ouverte et de façon à avoir un flux descendant le long de la dalle.

L'air est réglé en température par un circuit annexe composé d'une gaine branchée en dérivation au bas du caisson. Deux groupes de ventilateurs forcent l'air à circuler dans une batterie de refroidissement à eau glycolée et dans une batterie de chauffage et de régulation électrique. Cette gaine est revêtue de 10 cm d'isolant cellulaire.

La même gaine, reliée au ventilateur haute pression, sert aussi à la mise en pression du caisson. La régulation manuelle de la pression de celui-ci est réalisée en ouvrant ou fermant le volet d'une lumière d'échappement.

3.2 Caisson mobile

C'est le caisson de mesure. Sa température est maintenue constante et voisine de 20°C par circulation de l'air entre deux parois, et sur des résistances chauffantes de régulation.

Une prise d'air est raccordée par un tube souple à l'un des trois diaphragmes à travers lesquels on aspire l'air jusqu'à équilibre de la pression intérieure avec la pression extérieure atmosphérique. Une vanne de réglage fait varier le débit d'air aspiré par le ventilateur basse pression.

3.3 Régulation en température

La régulation de la température dans les deux caissons est réalisée à l'aide de thermostats commandant des relais qui alimentent des résistances électriques. La capacité de refroidissement est déterminée soit par la température de l'eau de refroidissement, soit par la fermeture manuelle de la vanne d'arrivée du fluide.

3.4 Régulation en pression

En cours de mesure de perméabilité à l'air, le réglage en pression du caisson fixe est obtenu grossièrement par une vanne à l'entrée du ventilateur haute pression, et de manière plus fine, avec la vanne de sortie d'air du caisson.

3.5 Mesure des pressions

La pression est mesurée dans le caisson fixe à l'aide d'un manomètre Béry mesurant jusqu'à 1500 Pa à 5 Pa près.

Pour le caisson mobile, on utilise un manomètre Ascania de 0 à 1500 Pa, avec lecture au 1/10 de Pa permettant de mesurer la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du caisson.

3.6 Mesure des débits

Trois diaphragmes sont utilisés : le premier de 0 à 20 m³/h, le deuxième de 20 à 50 m³/h, le troisième de 50 à 300 m³/h.

On augmente ou l'on diminue avec la vanne de réglage l'aspiration basse pression du ventilateur, jusqu'à ce que la pression intérieure du caisson mobile soit égale à la pression atmosphérique. On mesure alors la différence de pression créée par le diaphragme à l'aide d'un autre manomètre Ascania. Les courbes représentant le débit en fonction de la pression donnent alors le débit d'air traversant le diaphragme (fig. 3, 4 et 5).

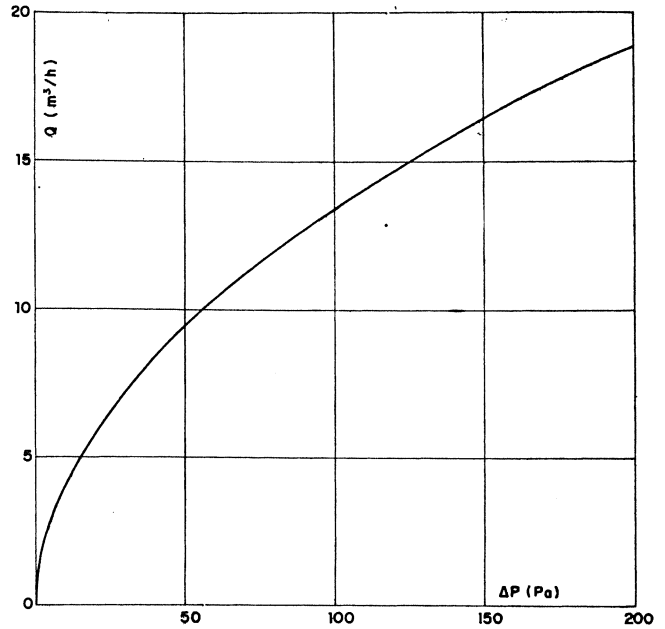


Figure 3 Courbe caractéristique du diaphragme n° 1 (0 à 20 m³/h)

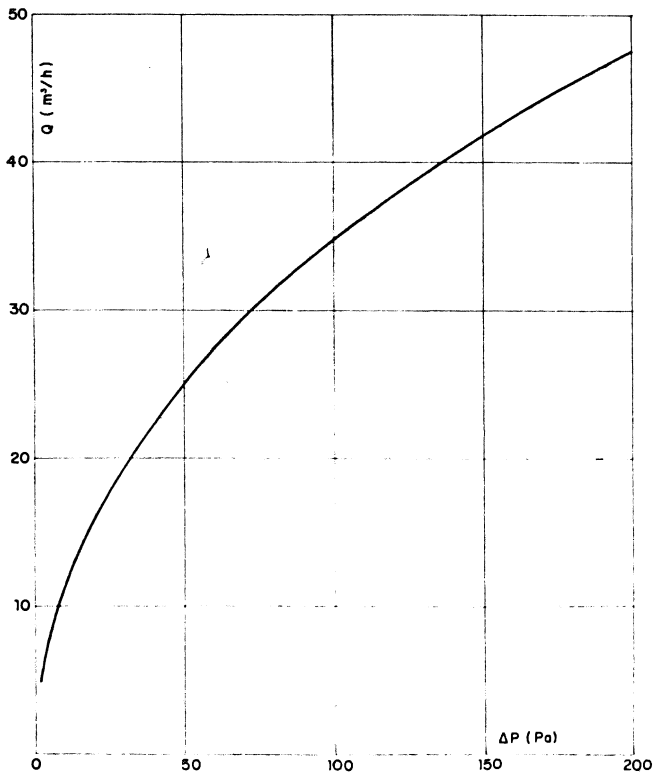


Figure 4 Courbe caractéristique du diaphragme n° 2 (20 à 50 m³/h)

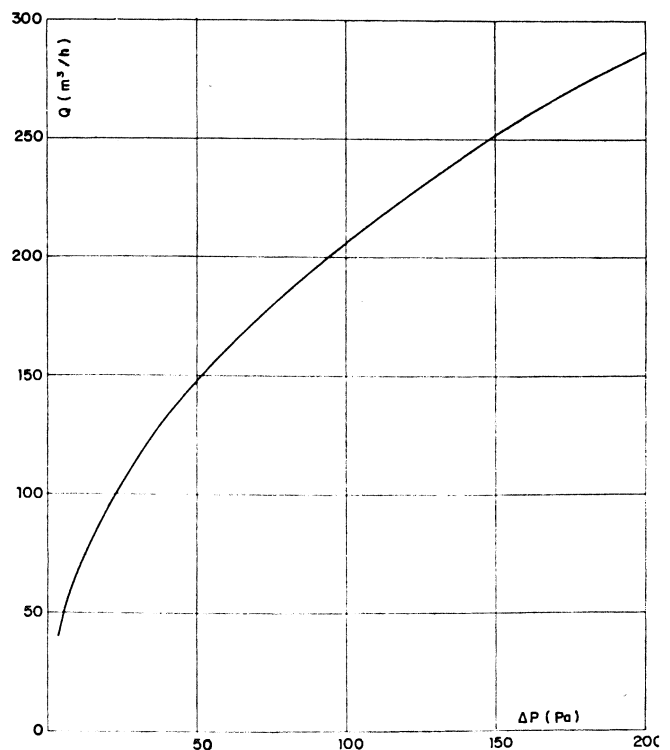


Figure 5 Courbe caractéristique du diaphragme n° 3 (50 à 300 m³/h)

Tableau I Résultats de l'étalonnage des diaphragmes (pressions en Pa, débits en m³/h)

Diaphragme	N° 1		N° 2				N° 3			
	1 trou		2 trous		4 trous		8 trous		18 trous	
	ΔP mesurée	Débit calculé	ΔP mesurée	Débit calculé	ΔP mesurée	Débit calculé	ΔP mesurée	Débit calculé	ΔP mesurée	Débit calculé
5	22	6.15	11.5	12.3	45.7	2.46	5.2	49.1	27	110.7
10	42.5	8.70	24	17.4	103	34.8	11.0	69.6	56.5	156.5
15	65	10.8	37	21.5	159	42.5	16.2	86	85.2	191
20	85	12.25	50	25	203.4	48	22	99	113.9	220
25	105	13.75	63.5	27.5			28	110	144	247.5
30	125	15	77	31			33.6	121	173	270
35	147	16.2	90	33			39.5	130		
40	166	17.4	102	34.5			44.5	140		
45	188	18.4	118	37.5			51	148		
50	208	19.44	130	39			57	155.54		

Les diaphragmes sont étalonnés à l'aide d'une plaque perforée de 24 trous égaux dont on peut obturer un certain nombre. Cette plaque est fixée sur la dalle, et l'on crée une pression dans le caisson fixe. Un débit d'air calculable, donc connu, passe par les trous laissés ouverts. Le même débit passe par le diaphragme à étalonner. La différence des pressions de part et d'autre du diaphragme correspond donc à ce débit.

En augmentant par paliers la pression, on peut ainsi tracer les courbes d'étalonnage de chaque diaphragme, le débit étant directement proportionnel à la surface de l'ouverture, on peut ainsi s'assurer la possibilité de passer d'un diaphragme à l'autre en cours d'essai (tableau I).

3.7 Mesures des déformations

Elles dépendent de l'élément à étudier. Si l'éprouvette comporte des parties mobiles, on mesure :

a) les changements dans la géométrie de chaque partie, à l'aide d'un dilatomètre à pointes pour les variations de longueur, avec des comparateurs pour le gauchissement;

b) les déplacements des parties constituantes, l'une par rapport à l'autre, à l'aide de comparateurs.

4 Mise au point de l'appareillage

Pour vérifier le fonctionnement de l'appareillage d'essais, on a utilisé une croisée en bois, à deux vantaux ouvrant à la française, avec dormant sans meneau.

4.1 Essais de vérification

Il s'agissait surtout de vérifier :

- le régime de température que l'on peut obtenir;
- la régulation de chacun des caissons (amplitude de température);
- la reproduction des coefficients d'échanges superficiels;
- les différences de température entre haut et bas de chaque caisson;
- les variations du régime des températures dans les caissons et sur la fenêtre, lors de la montée en pression pour les mesures de perméabilité à l'air;
- la durée de ces mesures;
- l'influence d'une erreur systématique due à un défaut d'étanchéité du caisson mobile, sur le débit mesuré.

4.2 Résultats des essais

4.21 Températures et régulations

Pour l'étude des conditions d'hiver, on peut obtenir, dans le caisson fixe, en régime permanent, une température de $-8\text{ °C} \pm 1^\circ$ en 2 heures avec une température du caisson mobile réglée à $22^\circ \pm 1^\circ$.

Pour l'étude des conditions d'été, on peut obtenir rapidement (1 h) dans le caisson fixe, une température de $60^\circ \pm 2\text{ °C}$ (la température d'essais est de 55 °C).

4.22 Coefficients d'échanges superficiels

On fait le rapport des différences de température, entre l'air de chaque caisson et la vitre (la température sur les deux faces de la vitre est la même à 1 demi-degré près).

Essai	Caisson	Air	Vitre	ΔT	Rapport
à froid	fixe mobile	- 6 °C	12°	18°	} 1,5
		+ 24 °C	12°	12°	
à chaud	fixe mobile	54 °C	31°	23°	} 2,3
		21 °C	31°	10°	

Le rapport h_e/h_i des coefficients d'échanges superficiels devant être voisin de 2, on a branché, sur le circuit de ventilateur un alternostat permettant d'ajuster ce rapport le plus précisément possible.

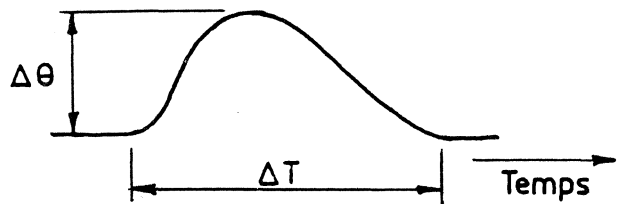
4.23 Ecarts de température entre le haut et le bas de chaque caisson

L'alternostat réglé, on a pu vérifier que l'écart de température entre le haut et le bas dans chacun des deux caissons, quelles que soient les plages de température, était toujours inférieur ou égal à 2 °C.

4.24 Essai de mesure de la perméabilité à basse température

L'enregistrement de la figure 6 donne les variations maximales $\Delta\theta$ des températures au cours de l'essai ; on y lit les résultats suivants :

		$\Delta\theta$
Caisson fixe (- 7 °C)	Air	+ 3°
	Profil	+ 1°
	Vitre	- 1°
Caisson mobile	Air	- 5°
	Profil	- 2°
	Vitre	- 1°



En général l'essai consiste à faire 3 séries de mesures à différentes surpressions pour chaque diaphragme. Les mesures sont faites en deux à trois minutes, et le régime est réstabilisé 5 à 6 minutes après.

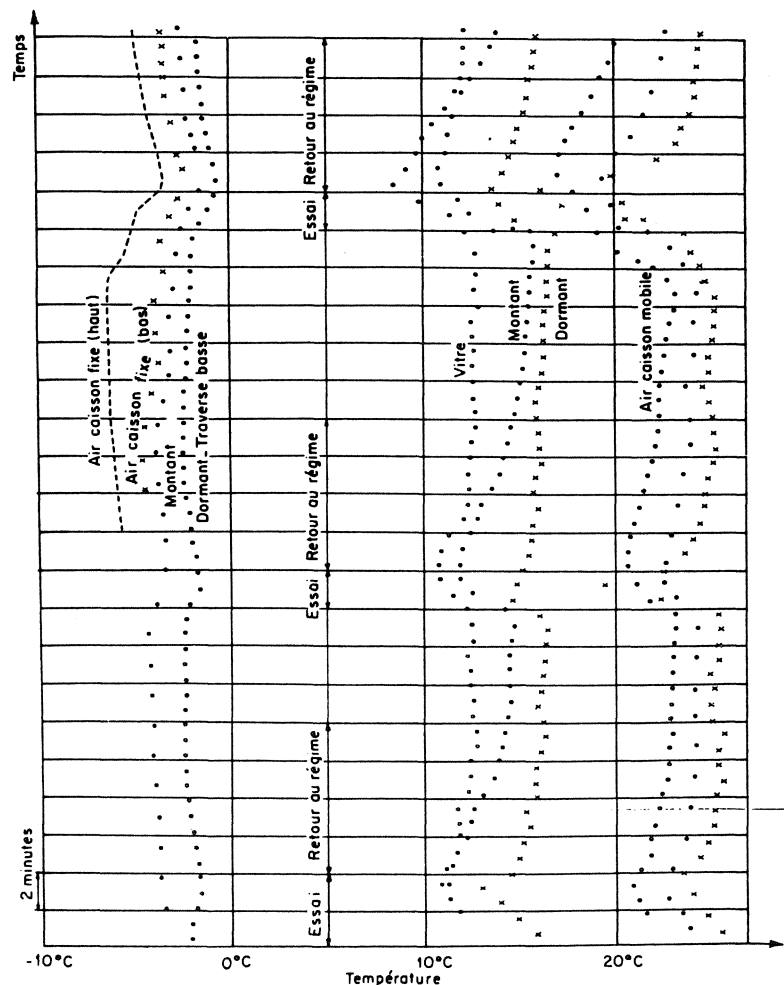


Figure 6 Variations de température au cours de l'essai de perméabilité à basse température

La perturbation, qui est donc très faible, ne dure qu'environ 10 minutes en tout. Selon le débit de la fenêtre, on utilisera 2 ou 3 diaphragmes (avec des fenêtres de faible perméabilité, le diaphragme 50-300 ne sera pas utilisé).

4.25 Incidence des fuites du caisson mobile

Il est intéressant de connaître l'incidence d'un éventuel défaut d'étanchéité entre le caisson mobile et la dalle (fig. 7).

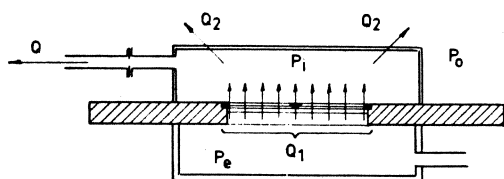


Figure 7 Etude de l'incidence d'un éventuel défaut d'étanchéité entre le caisson mobile et la dalle

Soient :

P_o la pression extérieure au caisson

P_e la pression établie dans le caisson fixe

P_i la pression dans le caisson mobile

Q_1 les débits des fuites d'air par les joints de fenêtre

Q_2 le débit des fuites du caisson mobile

Q le débit mesuré au diaphragme.

Dans le cas idéal, on a $P_i = P_o$, $Q_2 = 0$ et $Q = Q_1$.

Supposons qu'il n'en soit pas ainsi et qu'on ait $P_i > P_o$. Comme P_o et P_e sont supposées fixées, cela signifie que Q et Q_1 ont subi respectivement des accroissements ΔQ et ΔQ_1 (négatifs en l'occurrence) tels qu'on ait entre les valeurs absolues :

$$\Delta Q = \Delta Q_1 - Q_2$$

Calculons ΔQ_1 . On peut écrire :

$$Q_1 = K_1 (P_e - P_i)^n$$

K_1 étant un coefficient dépendant de la surface et de la forme des ouvertures et

n un exposant compris entre 1/2 et 1.

Et l'on a donc également, par hypothèse :

$$Q_1 - \Delta Q_1 = K_1 (P_e - P_i)^n$$

La dérivée logarithmique de Q_1 donne

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_1} = n \frac{\Delta (P_e - P_o)}{P_e - P_o}$$

mais $\Delta (P_e - P_o) = P_i - P_o$

$$\Delta Q_1 = n K_1 \frac{P_i - P_o}{(P_e - P_o)^{1-n}}$$

Mettant, de même, Q_2 sous la forme

$$Q_2 = K_2 (P_i - P_o)^{n'}$$

On trouve, pour ΔQ , l'expression :

$$\Delta Q = (P_i - P_o)^n \left[n K_1 \left(\frac{P_i - P_o}{P_e - P_o} \right)^{1-n} - K_2 (P_i - P_o)^{n' - n} \right]$$

Le terme $n K_1 (P_i - P_o)^n$ représente une fraction des fuites de la fenêtre sous une différence de pression $(P_i - P_o)$ égale à l'erreur de lecture.

Le manomètre de zéro utilisé permettant facilement de lire le pascal, ce terme est très faible ; il est encore minoré par la fraction $\left(\frac{P_i - P_o}{P_e - P_o} \right)^{1-n}$ toujours inférieure à 1 et peut être négligé ; on a donc alors $\Delta Q = K_2 (P_i - P_o)^{n'}$

$$\text{Soit } \frac{\Delta Q}{Q_1} = \frac{K_2 (P_i - P_o)^{n'}}{K_1 (P_e - P_o)^n}$$

Pour $n = n' = 2/3$

$$P_e = 100 \text{ Pa et } P_i - P_o = 1 \text{ Pa}$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_1} = \frac{K_2}{K_1} \times 0,05$$

l'erreur relative sur Q_1 serait donc de 5 % au maximum si la perméabilité du caisson était du même ordre de grandeur que celle de la fenêtre. En fait, elle y est très inférieure dans les cas courants, sans jamais la dépasser dans le cas de fenêtres très étanches.

4.26 Influence de la température sur les mesures de débit pour une différence de pression donnée au diaphragme

La mesure étant effectuée en aspirant l'air du caisson intérieur, la température de l'air au niveau des diaphragmes est voisine de 20 °C. Il n'y a donc pas lieu de faire de correction de débit.

5 Application à l'étude de trois fenêtres en plastique

5.1 Éléments étudiés

On veut étudier, sur des fenêtres en matière plastique, les variations de perméabilité à l'air engendrées par les déformations instantanées ou résiduelles des profils, sous l'effet des variations de température extérieure.

On a étudié trois fenêtres en plastique, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- croisées à la française ;
- profilés en PVC rigide ;
- couleur blanche ;
- profilés complémentaires d'étanchéité.

5.2 Modalités de l'opération

5.2.1 Dispositif expérimental

L'éprouvette est scellée dans la dalle d'essais, conformément aux dispositions normales de mise en œuvre. Elle est munie de repères de mesures de longueur dans le sens des profils. On place des thermocouples (fig. 8) :

- dans la veine d'air du caisson fixe et à différentes hauteurs ;
- dans l'air du caisson mobile ;
- sur les montants et les traverses de l'ouvrant et du dormant de chaque côté ;
- sur chaque face du vitrage.

Ces thermocouples sont branchés sur un enregistreur qui donnera durant l'essai, les courbes de température et le temps de mise en équilibre thermique de l'éprouvette.

5.2.2 Mesure de la perméabilité initiale à l'air

Les deux caissons étant à la température de 20 °C, on trace la courbe « perméabilité à l'air » en fonction de la pression appliquée dans le caisson fixe.

5.2.3 Mesure de la perméabilité à l'air sous les conditions thermiques d'hiver

Dans le caisson fixe on établit la température de -10 °C, alors que l'on maintient 20 °C dans l'autre, et l'on attend que l'éprouvette soit en équilibre thermique. On fait alors de nouvelles mesures de perméabilité à l'air. Entre chaque point de mesure, il est nécessaire de revenir à l'équilibre des températures. Les mesures terminées, on effectue une nouvelle mesure après retour en équilibre à 20 °C.

5.2.4 Mesure des déformations sous l'influence d'un rayonnement thermique

Le caisson mobile est retiré, et remplacé par un cadre métallique sur lequel sont fixés des comparateurs qui permettront de mesurer le gauchissement des différents éléments, et leurs déplacements l'un par rapport à l'autre. On chauffe l'air du caisson fixe jusqu'à 55 °C, la vitre étant protégée sur sa face extérieure par un isolant léger collé afin de maintenir sa température voisine de celle de l'air intérieur. Les déformations sont relevées périodiquement jusqu'à leur stabilisation.

La température est ensuite ramenée à la valeur ambiante, les déformations sont à nouveau mesurées jusqu'à l'équilibre, en température et dimensions, de l'ensemble. On retire alors les comparateurs et leur support, pour permettre une nouvelle mesure de perméabilité.

On retire enfin la dalle pour faire une dernière mesure de déformations résiduelles, à l'aide du déformètre à pointes.

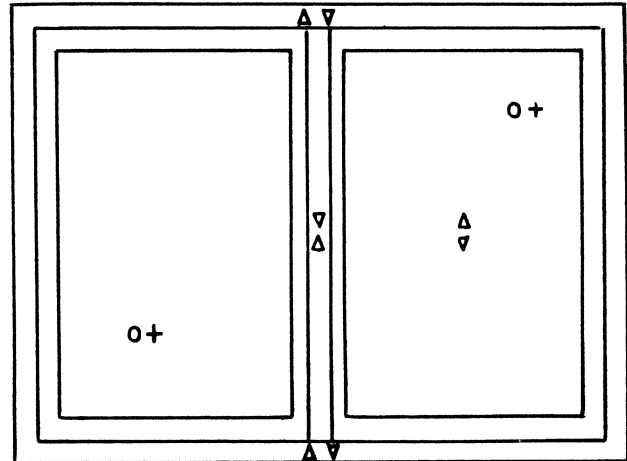


Figure 8 Disposition des thermocouples

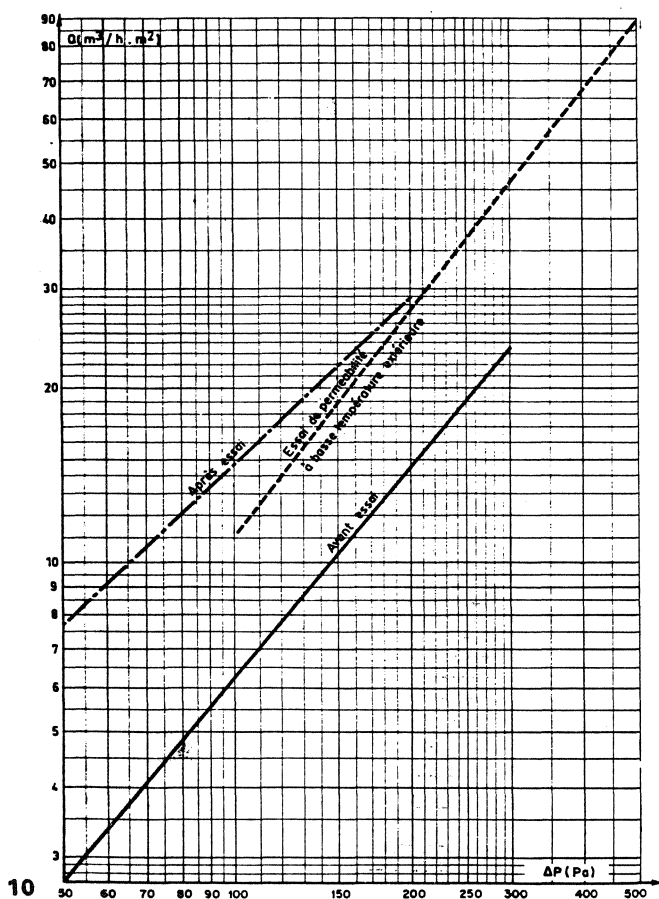
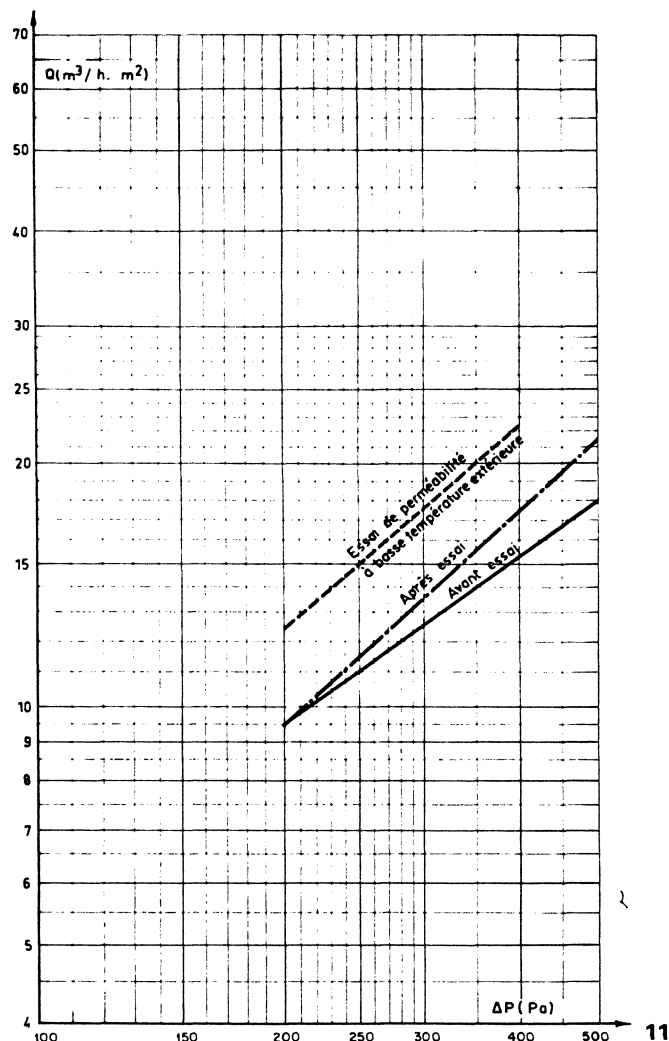
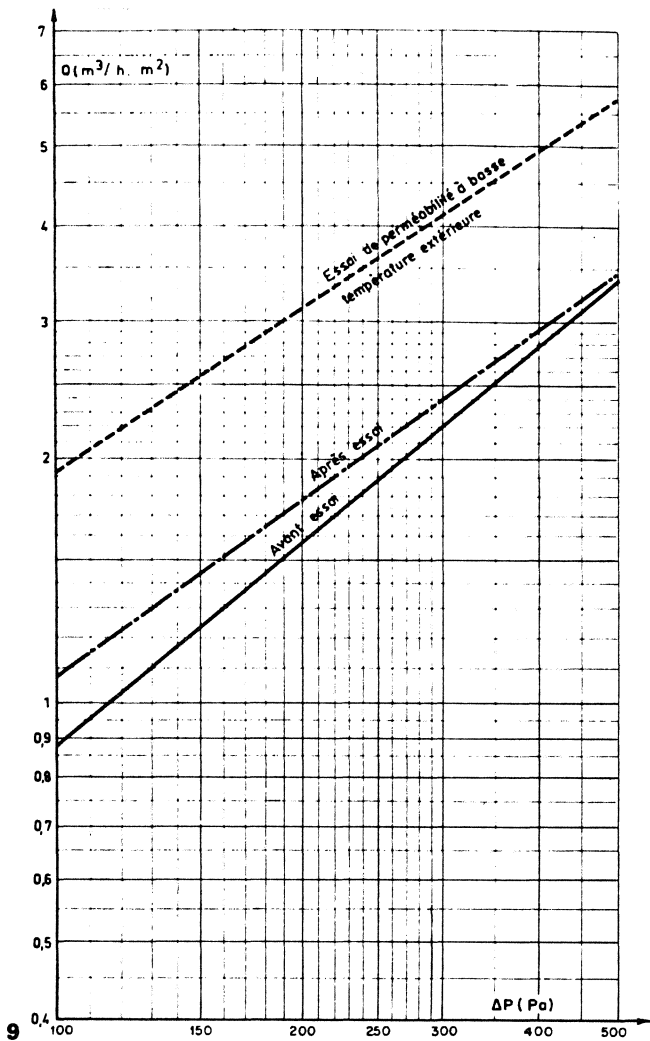
- dans le caisson fixe
- + dans le caisson mobile
- Δ sur l'éprouvette dans le caisson fixe
- ▽ sur l'éprouvette dans le caisson mobile

5.3 Présentation des résultats - Conclusions

On donne dans les pages suivantes, pour les trois fenêtres étudiées, les valeurs mesurées de la perméabilité à l'air, avant, pendant et après essais (tableau II), ainsi que les courbes correspondantes en coordonnées logarithmiques (fig. 9, 10 et 11).

Tableau II Résultats des essais de perméabilité à l'air de trois fenêtres en matière plastique

	Δ P pascal	Q (m ³ /h.m ²)			
		Fenêtre n° 1	Fenêtre n° 2	Fenêtre n° 3	
Avant essais	100	0,88	6,9	9,5	
	150		10,4		
	200		13,7		
	250	1,88	23,6		
	300				
	400				
500	3,40	18			
Essais de per- méabilité à basse température extérieure	100	1,92	11	12,5	
	200	3,2	31		
	300	5,7	46		
	350		66		
	400		86		
	500	86	25		
Après essais	100	1,08	13,5	9,5	
	200	2,04	25,5		
	300	2,84			13,7
	400				17,5
	500				21,5
	Températures d'essais	- 7 °C + 22 °C	- 5 °C + 25 °C		- 5 °C + 25 °C



Figures 9, 10 et 11 Essai de perméabilité à l'air des fenêtres nos 1, 2 et 3

On voit d'après ces courbes que :

- en règle générale, la perméabilité à l'air augmente fortement lorsque la face extérieure est refroidie à -10°C ; pour la fenêtre n° 1 par exemple, les valeurs ont pratiquement doublé;
- les retraits dus au chauffage entraînent une augmentation de la perméabilité à l'air.

Pratiquement, il s'ensuit plusieurs conséquences :

1. Au point de vue du classement de perméabilité à l'air, des fenêtres de ce type peuvent changer de classe selon les températures;
2. Selon les qualités d'extrusion, les retraits différentiels se font plus ou moins sentir sur la perméabilité après essais;
3. Les fenêtres essayées étaient toutes munies de profilés complémentaires d'étanchéité, qui se maintiennent toujours assez bien en place malgré les déformations; il serait nécessaire d'étudier ce qui peut se passer lorsque le profilé n'existe pas.