

LA PERMEABILITE A L'AIR DES ENVELOPPES

Méthode de mesure

Par V. RICHALET
et J.P. GIBERT - CETE de Lyon

Les défauts d'étanchéité de l'enveloppe des bâtiments amenuisent les efforts pour la meilleure performance énergétique des procédés utilisés dans la construction : isolation, ventilation, chauffage à haut rendement,.. Ces défauts se produisent principalement au niveau des ouvrants en façade, des joints de fabrication, des interrupteurs et des prises. Il est devenu impératif de les quantifier et de les prendre en compte avec exactitude dans le calcul des déperditions, notamment dans le cadre du diagnostic thermique.

Dès 1980, le C.E.T.E. de Lyon s'est préoccupé de connaître le niveau d'infiltration d'air parasite dans le bâtiment. Dans cette optique, de nombreux essais de perméabilité à l'air ont été effectués sur des bâtiments neufs et anciens. Ces essais, réalisés au moyen d'un banc de mesure par dépressurisation, sont utiles pour la mesure du débit d'air parasite dans des conditions de pression données et permettent d'apprécier la qualité de l'enveloppe. Associés à des prises de vue par caméra infra rouge, ils permettent de localiser les infiltrations, et dans certains cas les cheminements d'air. Nous nous attachons dans cet article à décrire la procédure expérimentale utilisée et les précautions à prendre pour éviter des erreurs d'interprétation ; nous faisons appel à une étude importante sur l'extrapolation de ces mesures au dessous des plages de pression de mesure.

LA PERMEABILITE A L'AIR DES BATIMENTS

La perméabilité de l'enveloppe ou d'une partie de l'enveloppe d'un bâtiment est le débit d'air, un mètre cube par heure qui la traverse, lorsqu'il est soumis à une différence de pression spécifiée, entre l'intérieur et l'extérieur.

En France, le DTU et les règles Th spécifient sa valeur par une différence de pression de 1 pascal. Cet usage est fréquent mais pas systématique, certains spécifient la perméabilité sous 10 pascals. Les Américains, par exemple utilisent eux aussi 10 pascals, les Canadiens prennent 4 pascals, les Suédois 50 pascals.

Le présent article décrit des mesures de perméabilité réalisées en dépression, c'est l'usage courant, mais certaines valeurs ont été établies au moyen de mesure par la surpression du bâtiment. Les résultats sont comparables pour des bâtiments équipés d'ouvrants de très bonne qualité, mais ils diffèrent si les ouvrants sont équipés de joints qui se déforment sous l'effet de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur.

1 - METHODE DE MESURE DES INFILTRATIONS D'AIR

1.1 - DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE MESURE

Le dispositif expérimental permet de mettre les logements en dépression ou en surpression au moyen d'un ventilateur à vitesse variable et de mesurer le débit nécessaire au maintien de ces conditions ; celui-ci correspond au débit d'infiltration pour un écart de pression donné entre l'intérieur et l'extérieur.

L'expérimentation consiste à remplacer une des portes du local testé par une "fausse porte" parfaitement étanche en feuillure, sur laquelle sont reliés le ventilateur et le dispositif de mesure de débit par diaphragme (figure 1). Les entrées et sorties d'air volontaires sont alors obturées, de même que certains défauts d'étanchéité que l'on cherche à caractériser, telles que les liaisons ouvrant-dormant. On procède dans chaque configuration à une série de mesures débit et différentiel de pression de part et d'autre de la fausse porte (ΔP). Cette technique de mesure est également largement utilisée dans les autres pays.

Les conditions expérimentales "in-situ" sont telles qu'il est souvent difficile d'avoir une plage de variation de ΔP équivalente à celle qui pourrait se produire dans un local, de part les effets combinés du vent, du tirage thermique et des débits extraits (entre 3 et 50 pascals). On est souvent limité par la précision des mesures (qui ne permet guère de mesurer des pressions au dessous de 10 pascals), et par la puissance du ventilateur.

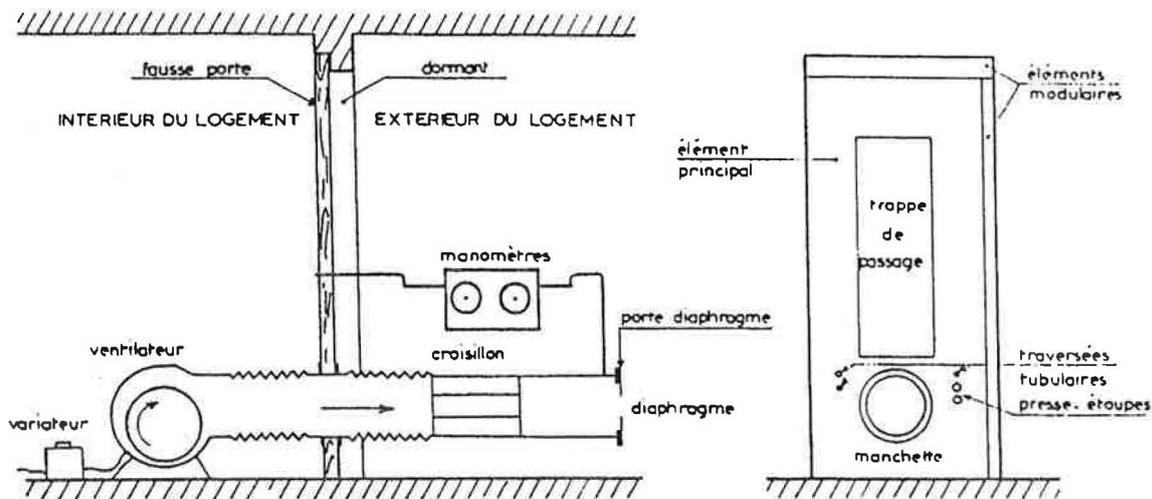


Figure 1 - Dispositif de mesure sur site de la perméabilité.

1.2 - LOI DE COMPORTEMENT

Un traitement statistique des couples de valeurs (Δp) permet d'ajuster une courbe de type puissance, généralement admise comme loi de comportement d'une fissure :

$$q = K \Delta p^n \quad \text{avec } 0,5 < n < 1$$

et de calculer les 2 paramètres K et n et leurs intervalles de confiance à 95 %.

La perméabilité du local testé est donnée par le débit, pour une pression différente de référence. En France, on conserve la valeur sous 1 pascal, c'est à dire K.

Si m est la perméabilité sous p_{ref} :

$$m = K (\Delta p_{ref})^n$$

Le débit sous Δp est alors :

$$q = m \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_{ref}} \right)^n$$

La figure 2 donne les lois expérimentales obtenues sur 3 logements de la campagne de mesure réalisée par le CETE de Lyon en 1983 . [1]

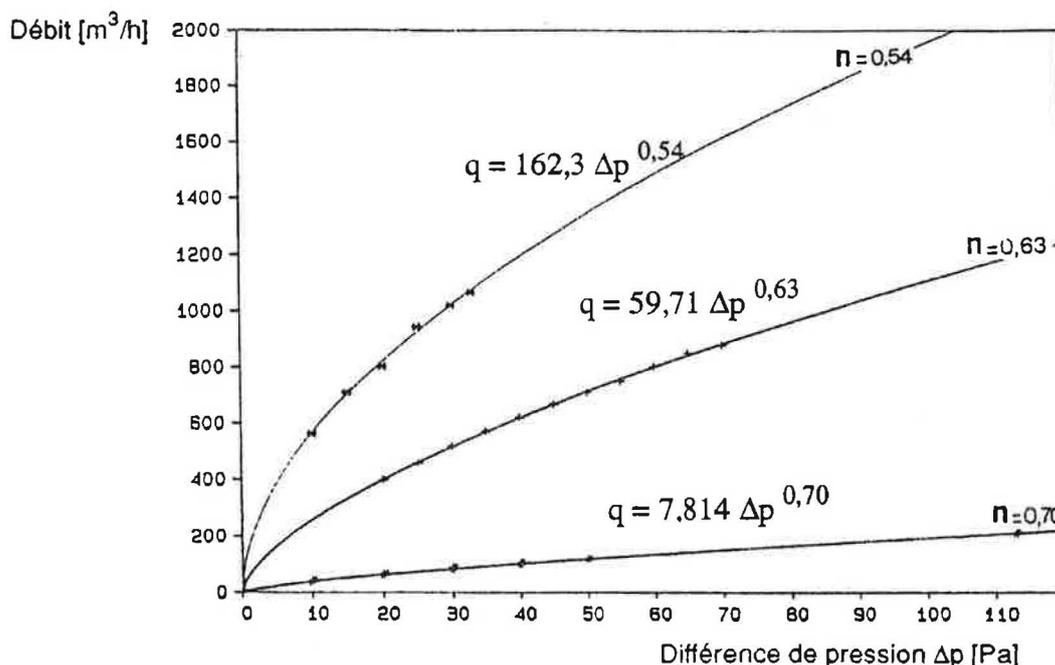


Figure 2 - Exemple de lois obtenues sur trois logements par l'ajustement d'une courbe de type puissance.

Signalons ici qu'un tracé sur site, directement par logiciel à partir des mesures ou éventuellement manuel en coordonnées logarithmiques, peut s'avérer très utile car il permet de déterminer rapidement l'ordre de grandeur de n et d'en tirer des enseignements importants. En particulier, lorsque n est proche de 0,5 on pourra conclure à l'existence d'un ou plusieurs orifices de taille importante, et procéder à la vérification du colmatage des entrées d'air, ou au repérage de cet orifice (au moyen d'une poire à fumée ou d'une caméra infra-rouge). Par contre, si la valeur de n est forte ($n > 0,8$), on sera en présence d'un local soit très étanche, et dans ce cas il est prudent de refaire une deuxième série de mesure pour augmenter la précision, soit présentant un très grand nombre de petites fissures. En pratique, la probabilité d'obtenir une forte valeur de n (0,8) pour un local peu étanche, est très faible.

La mesure par "fausse porte" a ainsi permis de caractériser des bâtiments neufs et anciens du point de vue perméabilité à l'air, et de définir des classes de perméabilité par procédé constructif en vue d'une utilisation dans le cadre du diagnostic thermique. Le tableau I résume les résultats de la campagne de mesure dans l'habitat neuf, réalisée par le CETE de Lyon [1].

	Structure lourde Isolation extérieure		Structure lourde Isolation intérieure		Structure légère	Structure Bois (2)
	individuel	collectif	individuel	collectif	individuel	individuel
Valeur moyenne (1)	0,25	0,11	0,36	0,17	0,39	0,74
Ecart-type	0,08	0,10	0,12	0,15	0,18	0,38
Taille de l'échantillon	6,00	20,00	54,00	21,00	15,00	19,00

- (1) Taux de fuite en Volume h^{-1} , ou perméabilité à l'air sous 1 [Pa] rapportée au volume habitable du local testé.
- (2) Résultats intégrant quelques opérations particulièrement médiocres.

Tableau I : Perméabilité moyenne de logements neufs, selon le type de la construction.

Il reste néanmoins des incertitudes sur la signification des coefficients K et n, c'est ce que nous avons cherché à analyser dans la suite.

1.3 - LIMITES DE LA MÉTHODE

La mesure d'une pression par un appareillage robuste pour permettre une utilisation dans des conditions difficiles, n'est pas d'une très grande précision. On ne peut espérer guère mieux que 2 [Pa] pour les manomètres par exemple. Cette erreur se répercute sur les coefficients K et n.

Deux autres erreurs viennent s'ajouter, liées à l'analyse statistique. Une erreur aléatoire, qui peut être réduite en multipliant le nombre de mesures, et une erreur due à la modélisation utilisée. Il est important de calculer les intervalles de confiance des coefficients K et n, pour éviter des erreurs d'interprétation. Il peut arriver, en effet, de trouver à l'issue des mesures un coefficient de perméabilité, supérieur à celui obtenu pour la façade entière, par exemple, pour une façade dont les liaisons ouvrant/dormant sont bouchées. A titre d'illustration, nous donnons l'exemple d'une opération d'habitat collectif à la figure 3. En calculant les intervalles de confiance à 95 % pour K, on s'aperçoit que ceux-ci sont très larges, en particulier à cause du faible nombre de mesures, et qu'ils se recoupent, ce qui oblige à douter de la validité des estimations.

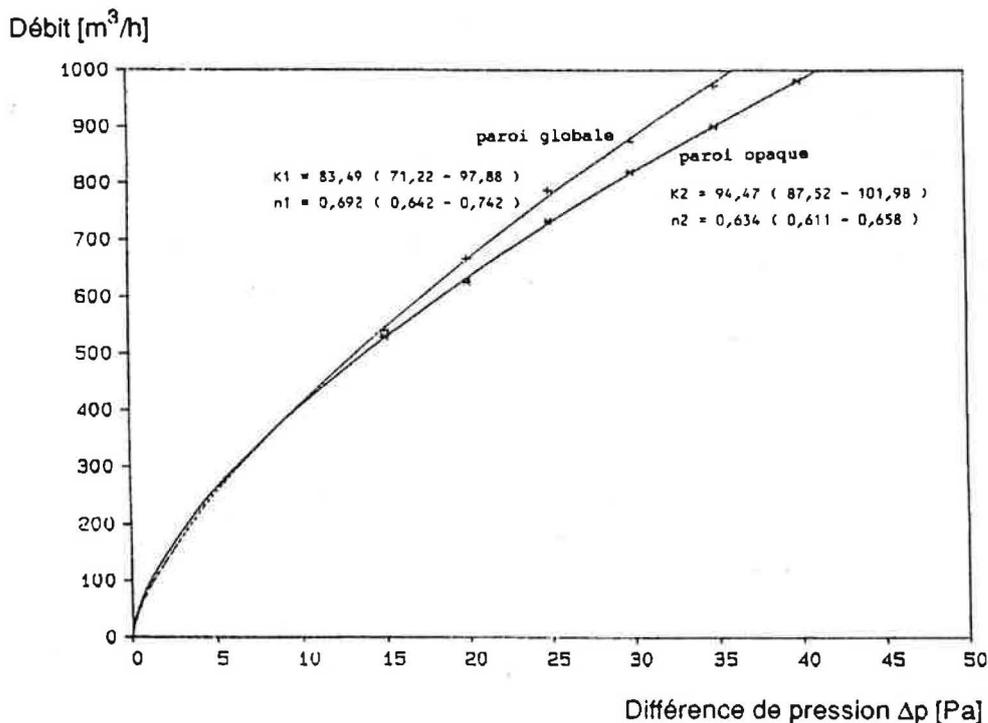


Figure 3 - Exemple de résultat obtenu sur un bâtiment d'habitation collective.

Cette explication peut s'avérer néanmoins insuffisante et nous avons pensé que l'erreur pouvait provenir de l'extrapolation de la loi expérimentale en dessous de 10 pascals. C'est ce que nous chercherons à analyser dans le deuxième chapitre.

1.4 - EVOLUTION DU DISPOSITIF DE MESURE

Avant de clore la partie descriptive du dispositif de mesure de perméabilité à l'air, nous pensons qu'il est intéressant de présenter ici ses évolutions actuelles. En effet, pour pouvoir faciliter et multiplier les investigations sur site, deux types d'améliorations sont envisagées concernant les as-

pects matériels d'une part, et d'utilisation d'autre part :

- aspects matériels : améliorer la portabilité du dispositif tout en maîtrisant sa fiabilité, ce qui veut dire réduire l'encombrement du matériel, diminuer le nombre des composants, et en faciliter le montage.
- aspects d'utilisation : simplifier et uniformiser la conduite du dispositif, ce qui peut se faire par un pilotage par ordinateur de la mesure, suivant une procédure de type système expert.

2 - EXTRAPOLATION DES MESURES POUR LES PETITS DEBITS

L'étude menée conjointement par le C.E.T.E. de Lyon et le C.E.T.I.A.T. [2] devait permettre de savoir si l'on pouvait se permettre d'extrapoler la courbe expérimentale débit-pression en dessous de la plage de mesures, et plus précisément quelle erreur est alors commise.

En effet, la mécanique des fluides permet de montrer que la loi empirique est une bonne représentation de l'écoulement dans les ouvertures en façades. La relation exacte est complexe à établir du fait de la multitude des paramètres dont il faut tenir compte : caractéristiques dimensionnelles des ouvertures (diamètre hydraulique, longueur, section), et cheminement de l'air avec pertes de charges singulières et réparties. Ces paramètres sont bien sûr inaccessibles sur site. On montre cependant que l'on a une représentation exacte par une loi de type :

- $q = K \Delta p^{0,5}$ en régime turbulent
- $q = K \Delta p$ en régime laminaire

et que l'on a $0.5 < n < 1$ dans les autres cas.

L'expression de K varie selon les auteurs et la forme des ouvertures étudiées. Une étude de l'E.N.T.P.E., à paraître, compare les expressions théoriques de l'écoulement à travers des ouvertures typiques du bâti.

2 - NATURE DES ESSAIS

La démarche consistait à tester un ensemble d'ouvertures types, puis d'éléments de façades, pour établir des corrélations de type $q = K \Delta p^n$ dans un domaine de variation de Δp de 1 à 100 pascals (entre 10 et 20 mesures) avec une précision supérieure à celle des mesures sur site.

Précision des mesures obtenues :

Δp : 5 % pour $\Delta p > 5$ [Pa]

débit : 5 - 1,6 % pour $5 < q < 100$ [m^3/h]

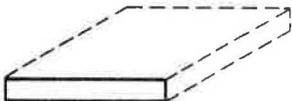
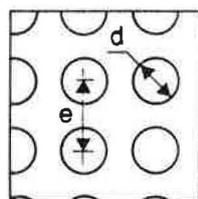
Cette précision s'est parfois révélée insuffisante.

2.2 - ESSAIS DE GRILLES ET DE FENTES

Les mesures effectuées sur 5 fentes et 7 grilles types ont permis de montrer que l'on obtenait de très bonnes corrélations pour l'ajustement des lois puissance (tableau II) et que la valeur de n se

situait bien dans le domaine précédemment défini ; les intervalles de confiance permettent d'encadrer la valeur trouvée à 5 % près pour K et 3 % pour n, excepté pour la grille de trame la plus fine pour laquelle K est calculé à 10 % près. Remarquons que le changement de débitmètre à 5 [m³/h] est sans doute la cause de la mauvaise détermination de n : pour les deux fentes les plus étroites, il est trouvé ici inférieur à 0,5.

FENTES		EN DEPRESSION	
Dimensions [mm x mm]	Section [cm ²]	K	n
1 x 152	1.52	0.673 (0.636, 0.713)	0.489 (0.018)
5 x 138	6.9	2.342 (2.215, 2.475)	0.4937 (0.019)
9.5 x 136	12.9	3.868 (3.805, 3.931)	0.514 (0.005)
10 x 161	16.1	5.078 (4.950, 5.210)	0.511 (0.009)
16 x 137	21.9	6.736 (6.642, 6.831)	0.506 (0.005)
Fente planéique		0.623 (0.581, 0.669)	0.632 (0.023)

GRILLE			EN DEPRESSION	
n° repère	d [mm]	e [mm]	K	n
1	0,5	1	5.216 (4.744, 5.735)	0.632 (0.031)
2	3	2	7.775 (7.619, 7.934)	0.515 (0.007)
3	3	6	7.526 (7.297, 7.761)	0.524 (0.010)
3	4	6	7.752 (7.686, 7.819)	0.506 (0.003)
5	5	6	9.743 (9.555, 9.930)	0.509 (0.006)
6	5	7	8.161 (7.951, 8.377)	0.504 (0.009)
7	5	12.5	6.746 (6.464, 7.040)	0.563 (0.014)

Tableau II a et b - Les valeurs de K sont accompagnées de leur intervalle de confiance à 95 %, les valeurs de n sont accompagnées de leur écart type.

Si l'on réalise la régression sur des plages distinctes de mesures : pour $\Delta p < 10$ [Pa] et $\Delta p > 10$ [Pa] (figure 4) on obtient des variations significatives de n , notamment pour les grilles. Une étude de Chastain et al. [3] permet en effet de situer le seuil de variation des pertes de charges à $p = 10$ [Pa], celles-ci étant constante au-delà.

A titre d'exemple, on pourra noter qu'entre ces 2 corrélations, n varie de 0.58 à 0.73 pour la grille de diamètre 0.5 [mm] et de 1 [mm] d'entraxe, et de 0.53 à 0.64 pour la grille de 5 [mm] de diamètre et 12.5 [mm] d'entraxe. Ceci conduit à une surestimation de débit sous 1 pascal si l'on extrapole la courbe trouvée au dessus de 10 pascals.

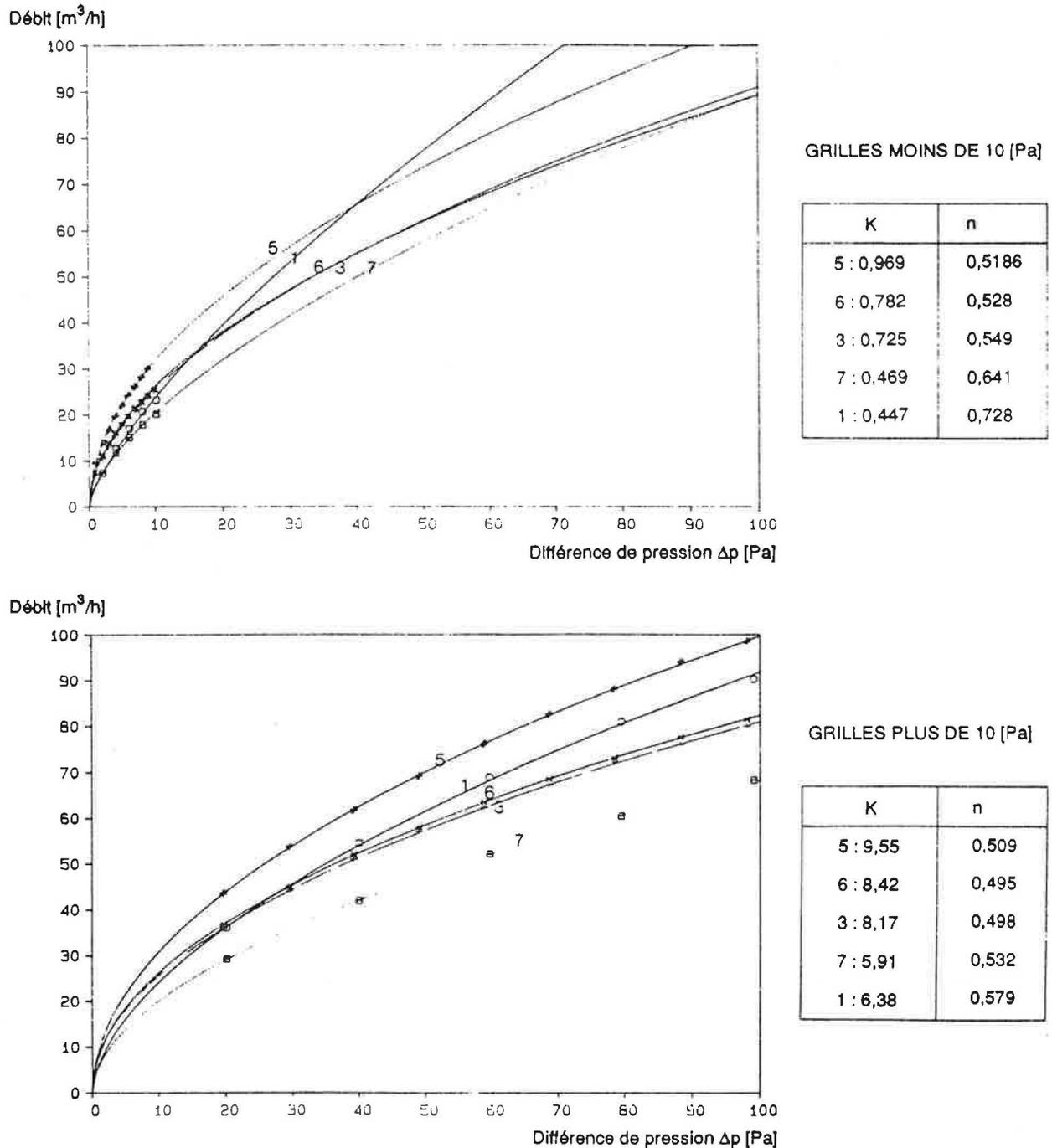


Figure 4 - Pour le cas des grilles, les relations obtenues diffèrent fortement selon que l'on utilise les mesures réalisées au-dessous ou au-dessus de 10 pascals.

Des essais ont été réalisés pour tenter de suivre l'évolution de n au cours de la mesure de la différence de pression (figure 5); ils tendraient à montrer que le seuil défini par Chastain peut se produire bien avant 10 [Pa] pour une fente seule telle que celles étudiées, mais cette tentative a été limitée par le nombre et la précision des mesures. La mesure en continu pourra seule permettre cette observation.

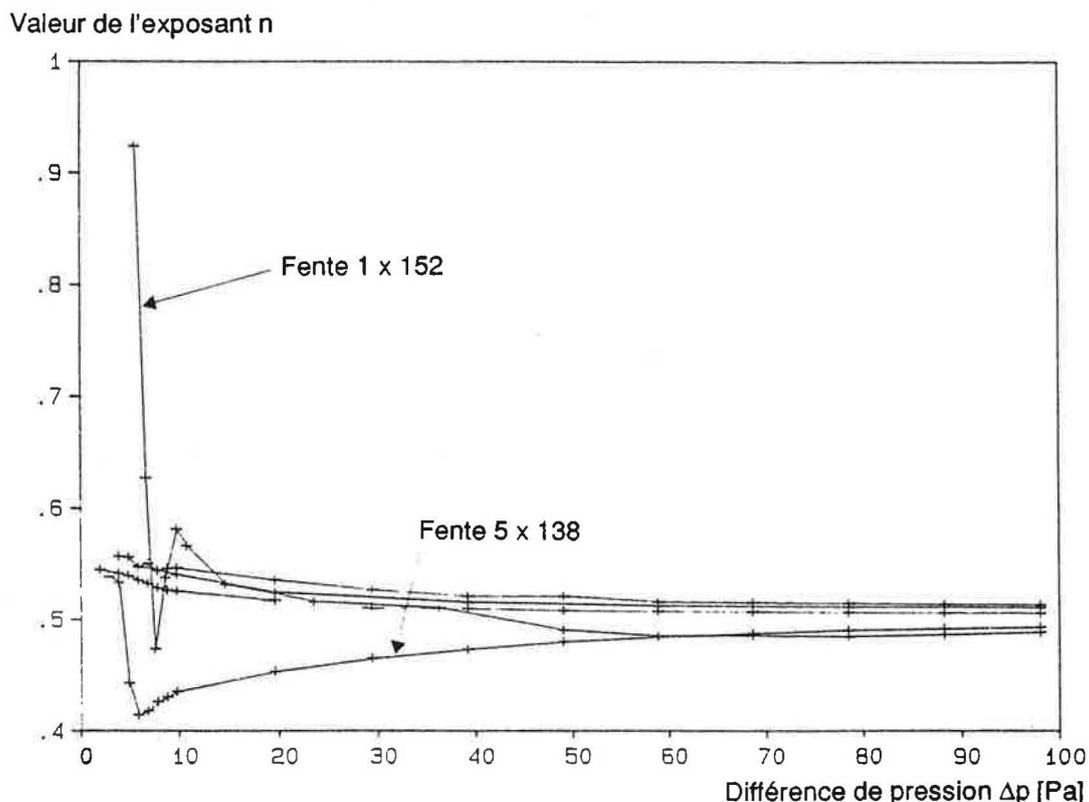


Figure 5 - Valeurs de l'exposant n selon les valeurs mesurées de la différence de pression utilisée pour sa détermination.

2.3 - ESSAIS DE MURS

Les essais précédents, quoique fondamentaux pour se recaler avec la relation empirique, étaient bien sûr insuffisants pour l'étude des fuites du bâti, qui peuvent être soit des trous, soit des fissures, de section et de profondeur variable.

Des mesures ont été effectuées sur 3 murs de constructeurs, bâtis sur place et testés par le même banc de mesure que précédemment. Il s'agit : d'un mur à ossature bois avec puis sans fenêtre, d'un mur en parpaings avec fenêtre et bouches d'entrée d'air, et d'un mur à ossature métallique avec fenêtre et bouches d'entrées d'air. Diverses configurations ont été obtenues en bouchant les liaisons ouvrant-dormant et les orifices de ventilation.

Les corrélations présentées (tableau III) viennent renforcer la validité de la loi expérimentale, avec une valeur moyenne de n mesurée égale à 0.66 pour l'ensemble des murs, c'est la valeur de référence prise par le C.S.T.B. [4].

Néanmoins, pour certaines configurations peu perméables, la détermination des paramètres est peu précise : K est calculé à 9 % près pour le mur à ossature bois sans ouvrant pour lequel les dé-

bits mesurés sont tous inférieurs à 5 [m³/h], et à 17 % près pour le mur à ossature métallique, toutes liaisons bouchées. la précision de la mesure ne peut être mise seule en cause ici.

MUR PARPAING

	EN DEPRESSION	
	K	n
N° 1 entrées d'air fermées	3.470 (3.245, 3.711)	0.682 (0.022)
N° 2 entrées d'air ouvertes	10.369 (10.127, 10.617)	0.625 (0.012)

MUR A OSSATURE BOIS

	EN DEPRESSION	
	K	n
N° 1 sans fenêtre	0.042 (0.039, 0.0457)	0.902 (0.027)
N° 2 avec fenêtre	0.846 (0.781, 0.917)	0.645 (0.026)

MUR A OSSATURE METALLIQUE

	Liaison ouvrant dormant	volets	Entrée d'air fen. 1	Entrée d'air fen. 2	Bouche auto-réglable fermée	Bouche auto-réglable ouverte	K	n
1	+	-	-	-	-	-	0.973 (0.953, 0.994)	0.624 (0.001)
2	+	+	-	-	-	-	0.908 (0.85, 0.969)	0.643 (0.002)
3	-	+	-	-	-	-	0.271 (0.232, 0.317)	0.751 (0.051)
4	-	+	-	-	+	-	1.666 (1.606, 1.728)	0.591 (0.012)
5	-	+	-	-	-	+	7.875 (7.723, 8.03)	0.482 (0.006)
6	-	+	+	-	+	-	8.534 (8.436, 8.632)	0.518 (0.004)
7	-	+	+	-	-	+	13.796 (13.747, 13.843)	0.510 (0.001)
8	-	+	+	+	-	+	20.126 (20.029, 20.224)	0.508 (0.002)

+ Section ouverte - Section bouchée

Tableau III - Résultats des essais de fentes et de grilles. Les valeurs de K sont accompagnées de leur intervalle de confiance à 95 %, les valeurs de n sont accompagnées de leur écart type.

En effectuant la régression en 2 parties sur cette dernière configuration, soit pour Δp inférieur à 10 [Pa] et Δp supérieur à 10 [Pa], on obtient deux courbes de courbures très différentes, respectivement $n = 0.92$ et $n = 0.68$ (figure 6). Les valeurs de K obtenues sont de plus en dehors de l'intervalle de confiance calculé pour la totalité des mesures. En conséquence, lorsque l'on extrapole la courbe obtenue pour Δp supérieur à 10 [Pa], l'erreur commise sur le débit à 1 pascal est de 70 % surestimé pour cette configuration. Elle est de 14 % pour le mur avec liaison ouvrant-dormant découverte.

Le mur bois et le mur parpaing ne permettent pas de voir aussi nettement cette différence. Il serait nécessaire d'étudier d'autres configurations de parois avant de conclure, mais on peut déjà dire que pour des bâtiments très étanches, on risque de surestimer très largement le débit réel sous

1 [Pa] en extrapolant une relation obtenue pour des différences de pression supérieures à 10 [Pa].

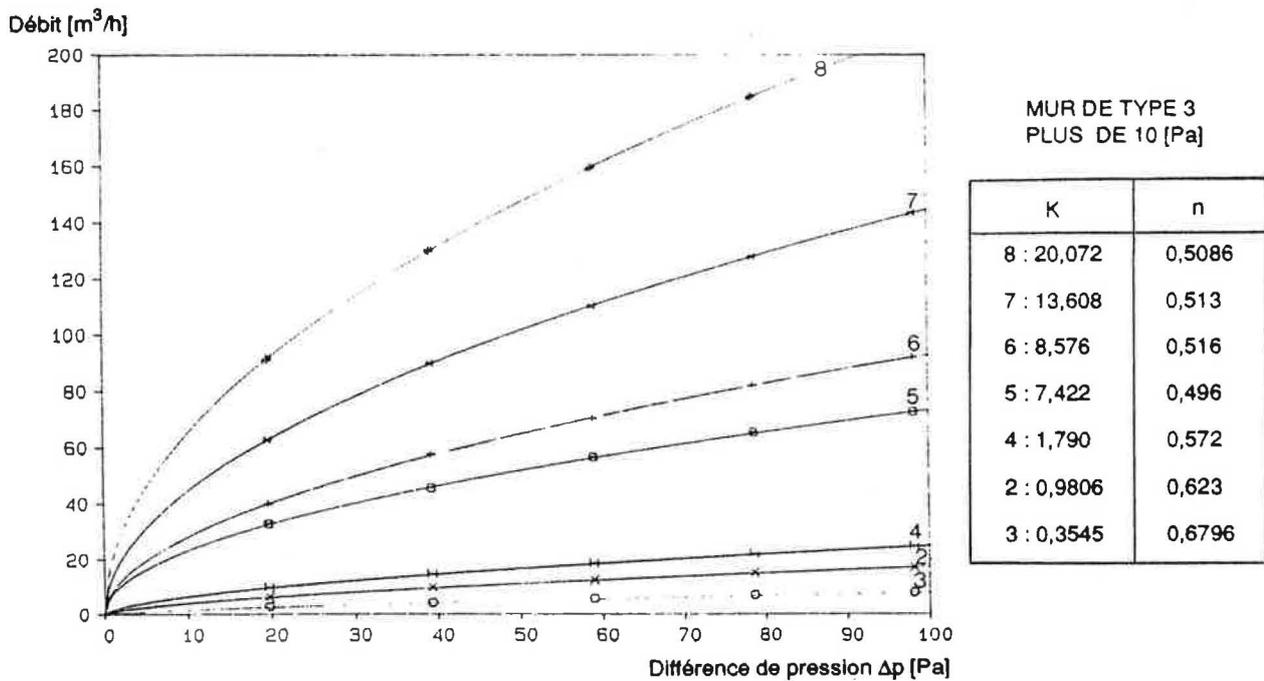
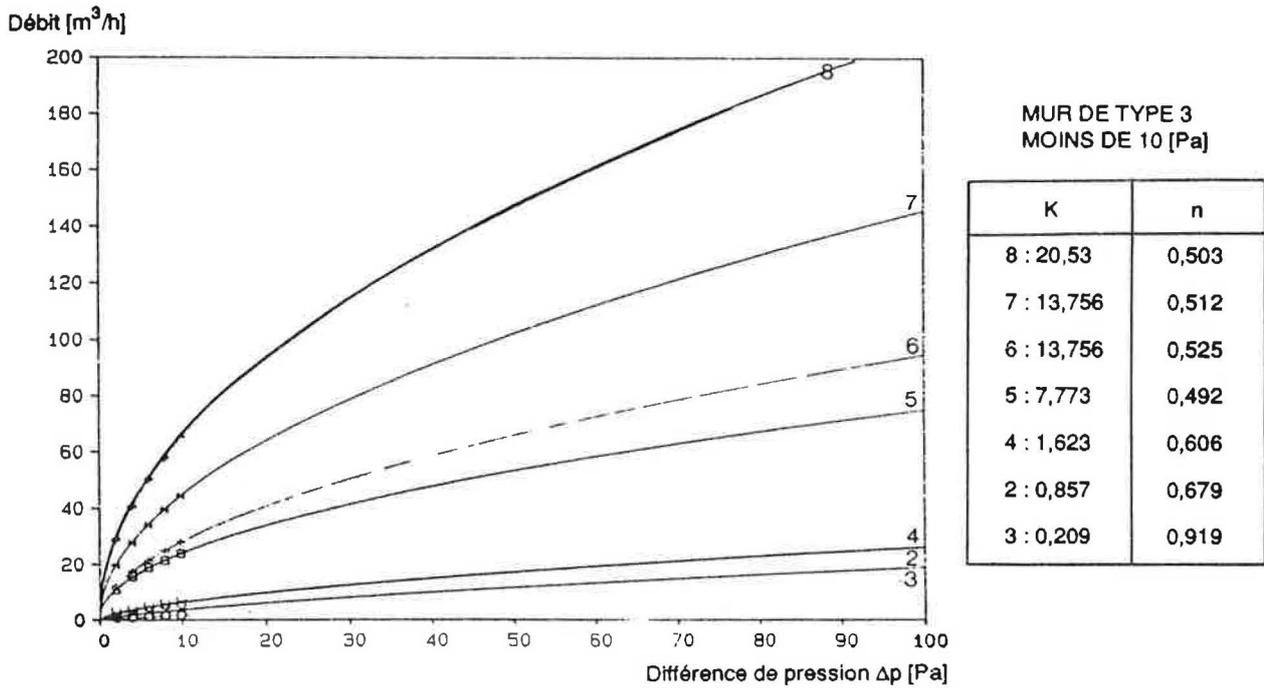


Figure 6 - Pour le cas des murs, voici les relations obtenues selon que l'on utilise les mesures réalisées au-dessous ou au-dessus de 10 pascals.

La solution consistant à prendre une valeur de n constante et égale à 0.66 en-dessous de 10 pascals ne constitue pas une réponse satisfaisante à cette question, particulièrement dans le cas où l'on a une ouverture importante, et dans celui où l'on a une enveloppe très étanche.

Prenons le cas des murs testés et calculons le débit sous 1 [Pa] par extrapolation des mesures supérieures à 10 [Pa] :

1 - en gardant le même n, donc $m1 = K$

2 - en prenant $n = 0.66$, donc $m2 = K \cdot 10^{n - 0,66}$

Le tableau IV donne les erreurs relatives associées en prenant comme valeur de m (sous $\Delta p_{pref} = 1$ [Pa]) vraie celle calculée à partir de la corrélation obtenue sur les mesures entre 0 et 10 [Pa].

e1 est donné pour l'extrapolation avec $n = 1$,

e2 est donné pour l'extrapolation avec $n = 0,66$.

		m	e1	e2
Parpaing	essai 2	11.90	17.7 %	- 15.8 %
Bois	essai 1	0.06	12.0 %	59.8 %
Ossature métallique	essai 2	0.86	14.4 %	5.0 %
	essai 3	0.21	69.6 %	77.4 %
	essai 4	1.62	10.3 %	- 9.9 %

Tableau IV - Ecart relatif (pourcentage) entre les perméabilités pour 1 [Pa] obtenus par les mesures inférieures à 10 [Pa] et par l'extrapolation des mesures supérieures à 10 [Pa].

Ceci montre clairement que l'on n'apporte pas d'amélioration systématique en prenant $n = 0.66$, et que l'on risque d'introduire des erreurs d'interprétation puisque les plus faibles débits sont majorés et les plus grands sont minorés.

Une recherche future devrait permettre de caractériser la loi de variation de n en fonction de Δp en-dessous de 10 [Pa].

3 - CONCLUSION

La caractérisation des infiltrations d'air par une loi de type $q = K \Delta p^n$ présente le triple intérêt :

- être accessible par une expérimentation sur site.

- pouvoir s'utiliser facilement dans les programmes de simulation aéraulique du bâtiment,
- permettre le calcul du débit parasite pour une pression de référence donnée, et ainsi d'entrer dans le cadre d'utilisation des calculs normalisés (règles du DTU).

Moyennant certaines précautions, sur les mesures et le calcul des coefficients de la régression, on peut en effet déterminer facilement la loi puissance précédente, avec une bonne détermination des paramètres.

Le problème de la variation du coefficient n en-dessous de 10 [Pa], peut conduire à une sur-estimation du débit lorsque le local testé est soumis à une faible différence de pression intérieur-extérieur, mais à ce jour il n'a pas été possible de caractériser cette variation de façon empirique, même pour une fente. Un retour à la mécanique des fluides s'avère une étape nécessaire pour continuer. On peut également attendre des résultats intéressants de l'acquisition en continu des mesures, qui permettra de suivre l'évolution de la loi avec le débit.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Perméabilité à l'air des logements neufs
CETE de Lyon - Publication H2E85 Mars 1983.
- 2 - Etude de l'écoulement à travers les défauts d'étanchéité du bâtiment - Extrapolation des mesures aux petits débits
CETE de Lyon - Janvier 88
- 3 - J.P. CHASTAIN, D.G. OLLIVER, P.W. WINNER
Computation of discharge coefficient for laminar flow in rectangular and circular openings
ASHRAE 1987, vol 93, part 2.
- 4 - C. MOYE
Perméabilité à l'air des bâtiments d'habitation
Cahiers du CSTB - Sept 85 - N 2019
- 5 - Etanchéité à l'air des bâtiments existants
Phase 1 et 2
CETE de Lyon - Avril 88
- 6 - A. GADILHE
Ecoulement dans les fissures : revue bibliographique
A paraître.