

1606

2194



EXAMEN CRITIQUE DES MODELES MATHEMATIQUES
DE PRISE EN COMPTE DES
RENOUVELLEMENTS D'AIR

S. BECIRSPAHIC

Octobre 1985

1 -INTRODUCTION

L'infiltration d'air devient actuellement la principale source de déperditions thermiques dans un bâtiment. Grace aux efforts consacrés pour les économies d'énergie l'isolation thermique des logements s'est nettement améliorée. D'après certaines études les pertes dues aux infiltrations atteignent entre 25 % des pertes totales pour une maison individuelle mal isolée et 50 % des pertes totales pour un bâtiment très bien conçu et réalisé. Il est donc normal que l'infiltration d'air devienne l'objet d'un intérêt grandissant.

Pour déterminer le débit d'air infiltré ou plus précisément le taux de renouvellement d'air, les méthodes expérimentales ont été développées.

Basées essentiellement sur l'utilisation d'un gaz traceur, ces méthodes permettent la détermination des valeurs réelles, dans le site même du bâtiment. La méthode de pressurisation qui permet de mesurer le débit d'air pénétrant dans le bâtiment sous une différence de pression donnée donne une idée de l'étanchéité mais ne permet pas de déterminer le taux de renouvellement d'air réel. Mais de toute façon une méthode expérimentale ne peut s'appliquer que sur un bâtiment existant. Pour pouvoir maîtriser les infiltrations il est nécessaire de disposer d'une méthode de calcul applicable même pour les bâtiments en projet. Pour appréhender les phénomènes complexes régissant les infiltrations, il faut construire des "modèles" qui permettent non seulement de calculer les taux de renouvellement d'air pour un cas considéré, mais également la possibilité de faire varier des paramètres et d'optimiser ainsi un projet.

2 - TYPES DE MODELES

L'extraordinaire développement des modèles ces dernières années rend presque caduc le classement suivant le type. Il faut pourtant l'indiquer car toutes ces méthodes de calcul ont été encore tout récemment utilisées.

a) Estimation basée sur l'expérience passée. Il ne s'agit pas à proprement parler d'un modèle de calcul, mais plutôt d'une sélection de valeur toute faite à utiliser telle quelle. Le manuel ASHRAE présentait par exemple les valeurs du taux de renouvellement d'air pour les maisons typiques, en climat typique. La dernière édition de ce manuel fournit davantage de statistiques provenant des mesures sur un grand nombre de maisons.

b) Modèle empirique

Pour un site donné les mesures systématiques ont fourni une quantité importante de données. Une corrélation peut être faite entre le taux de renouvellement d'air d'un côté et le vent et la différence des températures de l'autre. Or actuellement ce type de corrélation a une utilisation limitée et peu sûre.

c) Modèle mathématique traitant tout le bâtiment comme un volume unique.

Certains modèles très élaborés ont été développés ces dernières années. Leur défaut principal est cette supposition que tout le volume se trouve à la même pression. On ne peut donc les appliquer que dans certains cas.

d) Modèles mathématiques traitant le bâtiment comme un volume complexe.

Ces modèles tiennent compte des résistances internes au bâtiment. Ils sont forcément très complexes et exigent une quantité importante d'informations concernant l'écoulement et les répartitions des pressions. Cette complexité rend souvent injustifiée leur utilisation pour des maisons individuelles relativement simples. Or ils permettent l'étude complète de l'écoulement interne et trouvent leur utilité principale dans les problèmes de gestion de l'air (efficacité de ventilation, transport des particules ou de germes dans les hôpitaux, distribution de fumée en cas d'incendie).

3 - PRINCIPAUX MODELES ANALYSES

De nombreux modèles diffèrent souvent très peu. C'est une conséquence logique du fait qu'il est nécessaire d'introduire des hypothèses et que la tendance naturelle est de choisir ce qui semble le plus simple et raisonnable. Une sélection de neuf modèles est faite sur la base d'une littérature abondante. Le tableau 1 présente ces modèles.

TABLEAU 1
PRINCIPAUX MODELES ANALYSES

N°	ANNEE	PAYS	ORGANISME	REFERENCE
1	1970	ROYAUME UNI	B S R I A	1
2	1974	CANADA	N R C	2
3	1977	NORVEGE	NBRI	3
4	1978	PAYS BAS	T N O	4
5	1979	ROYAUME UNI	OSCAR FABER	5
6	1980	ETATS UNIS	I G T	9
7	1980	ETATS UNIS	L B L	10
8	1980	ROYAUME UNI	BRITISH GAZ	11
9	1980	ROYAUME UNI	B R E	13

4 - PROBLEMES DE MODELISATION

L'infiltration d'air est le passage d'air à travers les diverses ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment. Les débits d'air ainsi infiltrés dépendent des différences de pression provoquées par le vent sur l'extérieur et par une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Tous les paramètres entrant en jeu sont généralement très variables dans le temps et dans l'espace rendant ainsi l'établissement d'un modèle de calcul extrêmement difficile. Les principaux paramètres sont les suivants :

a) Vent

Il faut pouvoir estimer l'intensité et la direction du vent sur le site considéré à partir des renseignements fournis par la plus proche station météorologique. On doit tenir compte du relief, de l'environnement, des obstacles de toute sorte (autres bâtiments, arbres). La vitesse d'air à une hauteur donnée pourra servir pour les calculs mais il faut également supposer une répartition des vitesses sur une verticale. La turbulence du vent est aussi un paramètre important, il faut donc pouvoir l'évaluer et en tenir compte.

b) Effet du vent sur le bâtiment

Les coefficients de pression (positifs au vent et négatifs sous le vent) doivent être déterminés avec une précision suffisante.

c) Ouvertures

Les petites ouvertures dans les joints, autour des portes et des fenêtres doivent être évaluées. Il faut estimer leurs dimensions ainsi que leur distribution sur diverses parois du bâtiment.

d) Lois de l'écoulement

L'écoulement à travers les ouvertures peut être très différent : laminaire, turbulent ou le plus souvent en transition entre ces deux régimes. Les lois reliant le débit d'air à la différence des pressions dépendent du type de l'écoulement.

e) Effet de cheminée

La différence des pressions provoquée par la différence des températures doit être évaluée : il faut déterminer le plan neutre et supposer la relation entre le débit du au vent et le débit du à l'effet de cheminée.

f) Effet de chaudière de chauffage et de ventilation forcée

Les effets sur les répartitions des pressions et donc sur les infiltrations doivent être estimés.

5 - ANALYSES DE DIVERS MODELES

Plutôt que de présenter et décrire en détail chacun des modèles individuellement nous allons examiner les solutions proposées aux divers problèmes par les modèles recensés. Cet examen n'a pour l'instant rien de critique ; nous allons simplement montrer les similitudes et les variétés des hypothèses retenues par divers chercheurs. L'analyse critique et l'examen détaillé de diverses validations des modèles feront l'objet d'un rapport ultérieur.

a) Vent

Etant donné que la pression produite par le vent est proportionnelle au carré de la vitesse l'erreur due à la mauvaise estimation de l'intensité du vent peut devenir importante. En général on utilise dans les calculs la vitesse du vent à la hauteur maximale du bâtiment. Dans les stations météorologiques la mesure est effectuée à 10 mètres du sol. La répartition des vitesses sur une verticale a fait l'objet de très nombreuses études. Elle dépend des propriétés du sol et on la présente habituellement sous la forme :

$$\frac{v}{v_{10}} = a h^b \quad (1)$$

où :

v_{10} est la vitesse à 10 mètres du sol (m/s)

h est une hauteur donnée (m)

v est la vitesse à la hauteur h

a et b sont les coefficients fonction de la rugosité du terrain

Le choix de ces coefficients diffère d'un modèle à un autre.

Par exemple COLE et Al(9) prennent les valeurs suivantes :

Terrain	a	b
Ouvert	0,68	0,17
Campagne	0,52	0,20
Zone urbaine	0,40	0,25
Centre ville	0,31	0,33

SHERMAN et GRIMSRUD (10) présentent ces coefficients d'une manière légèrement différente. Ramenée à la même forme on obtient les valeurs suivantes :

Terrain	a	b
mer ou lac	1,03	0,10
ouvert	0,71	0,15
campagne	0,54	0,20
zone urbaine	0,38	0,25
centre ville	0,21	0,35

A partir des valeurs fournies par le service météorologique les vitesses sur le site sont généralement calculées en supposant le type de terrain et en choisissant les coefficients a et b correspondants.

La présence des obstacles à proximité du site considéré peut modifier sensiblement l'intensité du vent, mais également sa direction. La turbulence est généralement augmentée. Devant l'ampleur des complications, de nombreux modèles se limitent à reprendre les valeurs fournies par le service météorologique le plus proche. Or des erreurs importantes peuvent être ainsi introduites. Par exemple lors de la validation expérimentale de certains modèles, on trouve que l'accord entre le calcul et la mesure peut devenir excellent en supposant que le site considéré se trouve au centre ville au lieu de rase campagne (où il est effectivement). Il faudrait donc prendre une hypothèse a priori fautive pour obtenir un bon résultat. Bien qu'il soit difficile de tirer des conclusions définitives pour un problème aux paramètres multiples, il paraît évident que l'évaluation du vent doit être faite avec une extrême prudence.

b) Effet du vent sur le bâtiment

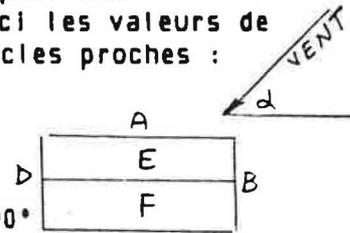
La répartition et le niveau des pressions dues au vent sur les faces extérieures des bâtiments conditionnent les infiltrations d'air. En connaissant la vitesse du vent v et la masse volumique ρ de l'air on calcule cette pression d'après :

$$p = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2)$$

où C_p est un coefficient qui doit être déterminé expérimentalement pour une forme de bâtiment donnée en fonction de la direction du vent.

De nombreuses études effectuées en soufflerie (entre autre par le CSTB) fournissent une quantité de valeurs pour des configurations variées. A titre d'exemple voici les valeurs de C_p obtenues pour une maison simple sans obstacles proches :

	0°	45°	90°
Mur A	-0,5	0,4	0,7
B	0,7	0,3	0,9
C	-0,5	-0,7	-0,5
D	-0,2	-0,6	-0,9
Toit E	-0,7	-0,1	0
F	-0,7	-0,8	-0,7



En fait pour un mur, C_p n'a pas une valeur constante sur toute sa surface. Or tous les modèles simplifient le phénomène en prenant les valeurs moyennes ou même en considérant que seul le mur au vent subit une augmentation de pression, les autres étant supposés être en air calme.

La turbulence du vent est généralement élevée et la différence des pressions locales sur un mur peut changer de signe, inversant ainsi l'écoulement. Peu de modèles prennent en considération ce phénomène.

c) Ouvertures

La détermination de la distribution des ouvertures par lesquelles l'air pénètre dans le bâtiment ainsi que l'évaluation de leurs dimensions doivent être effectuées afin de permettre l'application des modèles de calcul. Les fissures dans les murs au niveau des joints entre les murs et le plafond et le plancher, également autour des fenêtres et des portes, doivent être identifiées. Il reste de plus une fuite de fond produite par des ouvertures invisibles.

En fait, les auteurs des modèles essaient d'éviter ce problème lorsque cela est possible, en déterminant expérimentalement l'étanchéité du bâtiment. L'essai par pressurisation fournit des renseignements sur la qualité de la structure et il faut seulement pouvoir raccorder ces données avec les autres paramètres.

La notion de l'air équivalente de fuite a été introduite. Elle est égale à l'aire du col d'une tuyère avec laquelle on aurait le même débit d'air avec la même différence de pressions. Par définition cette aire équivalente A (leakage area) est calculée pour une différence de pression de 4 Pa d'après la relation :

$$q_v = A \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

où q_v est le débit (m³/s)
 $\Delta p = 4 \text{ Pa}$

(La perméabilité à l'air des parois, utilisée par certains auteurs, est définie de la façon suivante : une perméabilité de 1cm² laisse passer 1m³/h sous une différence de pression de 10 Pa. La définition est pratiquement identique. Au lieu d'une tuyère ayant le coefficient de débit proche de l'unité on prend un diaphragme avec un coefficient de débit proche de 0,6).

d) Lois de l'écoulement

Les auteurs des modèles choisissent généralement la relation :

$$q_v = k(\Delta p)^n \quad (4)$$

où k est un coefficient englobant l'aire de passage, la forme géométrique et la longueur de l'ouverture.

n est pris entre 0,5 et 1,0

La valeur de 0,5 correspond à un écoulement turbulent, la valeur de 1,0 à un écoulement laminaire.

Quel est le régime réel de l'écoulement à travers diverses fissures dans les murs ? Il dépend des dimensions et des pressions appliquées ce qui s'exprime par un nombre de Reynolds critique donnant le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité. SHERMAN et GRIMSRUD (10) considèrent que l'écoulement est pleinement turbulent et, de plus, tiennent compte de la variation de la masse volumique. Ils proposent donc la relation suivante :

$$q_v = A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (5)$$

LARSEN (3) considère que l'écoulement doit être en transition entre le régime laminaire et le régime turbulent. Il choisit donc n = 0,7.

ETHERIDGE et ALEXANDER (11) analysent la relation débit-pression avec un peu plus de détails. Pour les ouvertures importantes, plus ou moins volontaires (par exemple entrées d'air en façade) on considère que l'écoulement est turbulent. Pour les fissures et autres ouvertures de faibles dimensions l'écoulement est supposé laminaire et une relation complexe a été établie par les essais au laboratoire :

$$CAq_v^2 + \frac{BzL^2}{4\mu} \mu q_v - \frac{2A^3\Delta p}{\rho} = 0 \quad (6)$$

C et B sont constantes empiriques déterminées pour une géométrie donnée de fissures

Z est la profondeur des fissures

L est la longueur des fissures

μ est la viscosité dynamique de l'air.

Cette relation peut être écrite sous la forme :

$$\Delta p = a q_v + b q_v^2 \quad (7)$$

où a et b englobent la géométrie des fissures et les propriétés physiques de l'air.

cetiat

COLE (9) choisit les valeurs pour l'exposant n entre 2,5 et 0,65.

En fait, il apparaît clairement qu'il n'est pas possible de définir par une relation simple toute la gamme de régime d'écoulement. Les essais par pressurisation montrent généralement un accord acceptable si l'on suppose que l'écoulement est turbulent, mais l'extrapolation aux faibles différences de pressions montre des écarts importants. Comme l'essai par pressurisation prend en considération toutes les ouvertures on obtient une loi moyenne.

La plupart des modèles considèrent que les pressions sont stables et les fluctuations turbulentes sont négligées. Or si pour une fissure on a la pression intérieure p_{int} et la pression extérieure p_{ext} variables dans le temps, la différence de ces pressions est également variable :

$$\Delta p(t) = p_{ext}(t) - p_{int}(t) \quad (8)$$

On suppose toutefois que si l'on prenait un temps suffisamment long on aurait une valeur moyenne constante (10 minutes étant considérées comme suffisantes). La supposition que l'écoulement est quasi stationnaire est une approximation surtout pour les débits élevés où la relation entre q_v et Δp n'est pas linéaire. En outre les fluctuations de p_{int} et p_{ext} n'étant pas corrélées il est même possible d'inverser le sens de l'écoulement. En supposant que $\Delta p(t)$ a une répartition normale de Gauss on peut introduire la valeur quadratique moyenne des fluctuations turbulentes Δp_{RMS}

D'après ETHERIGDE et ALEXANDER (11) le débit moyen du aux fluctuations de pression q_{vT} est :

$$q_{vT} = 0,5 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \Delta p_{RMS} \frac{8A^3}{8zL^2\mu} \quad (9)$$

(voir la relation 6).

Cette relation est applicable aux faibles débits d'air pour lesquels le débit du à la différence des pressions moyennes est

$$q_v = \frac{8A^3}{8zL^2\mu} \Delta p \quad (10)$$

Combinant les relations (9) et (10) on peut écrire :

$$q_{vT} = F \cdot 0,4 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Delta p_{RMS}}{\Delta p} q_v \quad (11)$$

F est le facteur qui tient compte du fait que pour Δp très grand les fluctuations de pression ne sont pas assez fortes pour inverser le sens de l'écoulement et donc $q_{VT} = 0$. C'est grossièrement valable pour $\Delta p > 3\Delta p_{RMS}$. En général Δp_{RMS} n'est pas connu. On peut pourtant spéculer sur la relation entre $p_{ext RMS}$ et Δp_{RMS} . Pour les ouvertures larges, les fluctuations de la pression extérieure seront suivies plus fidèlement par la pression intérieure et donc Δp_{RMS} sera probablement beaucoup plus petit que $p_{ext RMS}$, ce qui n'est pas le cas pour les petites ouvertures. Ne pouvant pas aller plus loin dans leur analyse, ETHERIGDE et ALEXANDER prennent arbitrairement :

$$\Delta p_{RMS} = 0,5 p_{ext RMS}$$

e) Effet de cheminée

L'effet de cheminée est provoqué par la différence de températures entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Si l'on imagine un volume contenant seulement une ouverture près du plancher et une autre près du plafond et si l'air dans le volume a une température supérieure à la température extérieure, on trouvera un débit d'air entrant par l'ouverture inférieure et le même débit sortant par l'ouverture supérieure. Si les ouvertures étaient distribuées uniformément sur toute la hauteur du mur, on trouverait au milieu une position neutre, sans différence de pressions et sans débit.

Les auteurs de divers modèles utilisent généralement la même loi de base pour déterminer la pression due à cette différence de température :

$$\Delta p_c = \rho_0 T_0 g \left(\frac{1}{T_{ext}} - \frac{1}{T_{int}} \right) h \quad (11)$$

où Δp_c est la différence de pression due à l'effet de cheminée, h la hauteur du plan considéré, T_{ext} et T_{int} les températures absolues respectivement à l'extérieur et à l'intérieur.

$T_0 = 273^\circ K$ et $\rho_0 = 1,293 \text{ kg/m}^3$ masse volumique de référence

On trouve cependant d'autres formes toujours dérivées de la relation (11). Par exemple, ETHERIGDE et ALEXANDER (11) utilisent la relation :

$$\Delta p_c = 3462 \left(\frac{1}{T_{ext}} - \frac{1}{T_{int}} \right) (h - n) \quad (12)$$

où n est la hauteur du plan neutre et la constante égale au produit $\rho_0 T_0 g$

MODERA (17) préfère introduire la pression ambiante :

$$\Delta p_c = 0,0342 P \left(\frac{1}{T_{ext}} - \frac{1}{T_{int}} \right) h \quad (13)$$

tandis que SHERMAN et GRIMSRUD (10) utilisent :

$$\Delta p_c = \rho g \frac{T_{int} - T_{ext}}{T_{int}} h \quad (14)$$

Deux problèmes essentiels doivent être résolus : détermination de la position du plan neutre et la relation entre le débit de renouvellement provoqué par le vent et celui provoqué par l'effet de cheminée.

Certains auteurs supposent simplement que le plan neutre se trouve au centre et que les deux effets agissent de façon indépendante. Des analyses plus sophistiquées ont été pourtant développées. On essaie de déterminer pour chaque ouverture la différence de pression motrice par une analyse des interactions complexes des pressions dues au vent et à l'effet de cheminée et tenant compte du réseau des ouvertures sur tout le bâtiment. SHERMAN et GRIMSRUD (10) considèrent que généralement un des deux effets est dominant. Ils déterminent pour une différence de température donnée la vitesse maximale au-dessus de laquelle l'effet du vent est prédominant. Dans la zone intermédiaire le débit global est calculé par la relation :

$$q_t = \sqrt{q_v^2 + q_c^2} \quad (15)$$

où q_t est le débit global, q_v le débit du au vent et q_c le débit du à l'effet de cheminée.

CRALL (19) utilise la relation :

$$\Delta p = 4 \Delta p_c + \sqrt{2} \cdot \Delta p_v \quad (16)$$

pour déterminer la différence des pressions totales.

f) Installations de chauffage et de ventilation

En général on considère que les débits d'air de la ventilation mécanique ne dépendent pas des différences de pression ce qui normalement doit être exact dans les installations correctement conçues.

6 - VALIDATION EXPERIMENTALE DES MODELES

La vérification expérimentale est la seule méthode permettant de s'assurer de la validité d'un modèle. Or cette vérification n'est pas simple pour plusieurs raisons.

D'abord le résultat final produit par un modèle c'est-à-dire le taux de renouvellement d'air d'un bâtiment donné est entaché d'erreurs provenant de trois sources :

- erreurs de mesure ou de supposition concernant les grandeurs de base telles que la vitesse du vent,
- erreurs de transposition de ces grandeurs de base aux grandeurs utilisées dans les modèles telles que les coefficients de pression
- erreurs produites par le modèle meme caractérisant la qualité du modèle proposé.

Ensuite ce résultat de calcul doit être comparé au résultat de mesures qui est lui-meme entaché d'erreurs expérimentales.

Pour cette raison on considère généralement qu'un écart de 20 à 25% entre la valeur calculée et la valeur mesurée est acceptable. Une dispersion des résultats aléatoires dans cette limite est jugée satisfaisante sauf si les écarts sont de meme niveau et de meme signe semblant paraître comme des erreurs systématiques.

D'une façon générale l'accord entre le calcul et la mesure est meilleur lorsque la comparaison est faite par les auteurs des modèles. La raison n'est pas le manque d'honnêteté des chercheurs, mais le fait que les modèles sont souvent faits parallèlement aux mesures et divers ajustements sont introduits en fonction des résultats expérimentaux. Un vaste programme de comparaison entre divers modèles est entrepris depuis quelques années et l'on dispose déjà de nombreux renseignements. Les figures 1 à 9 donnent un aperçu des résultats comparés provenant des sources diverses.

Les taux de renouvellement d'air ou les débits d'infiltration calculés par un modèle sont comparés aux résultats expérimentaux. La ligne droite placée à 45° par rapport à l'abscisse correspond à l'accord parfait entre le calcul et la mesure. Les lignes droites correspondant aux écarts entre ces deux valeurs de 20 ou 25% sont également indiquées.

CONCLUSIONS

On dispose actuellement d'une large gamme de modèles de complexité différente permettant de traiter divers problèmes de conception des bâtiments, de ventilation ou de chauffage. La figure 10 donne comme exemple le schéma de principe du modèle LBL, un des plus sophistiqués. Pourtant, même ce modèle n'atteint pas toute la complexité possible car il considère tout le bâtiment comme un volume unique, sans résistance intérieure.

Les comparaisons avec les mesures montrent qu'il y a généralement une corrélation entre les taux de renouvellement d'air calculés et les taux mesurés, mais que les écarts peuvent être importants sans pouvoir en expliquer la raison. Un programme de validation expérimentale est entrepris depuis quelques années au niveau international. Une analyse critique des hypothèses adoptées et des méthodes utilisées devient de plus en plus nécessaire. Associée aux essais cette analyse devrait permettre de voir plus clair et d'aboutir ainsi à un modèle (ou à plusieurs modèles de complexité différente) qui serait incontestable. C'est essentiellement le sujet de la deuxième partie de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) JACKMAN, P. 1970 "A study of the natural ventilation of tall office buildings
J. Inst. Heat. Vent. Eng. 38
- 2) SANDERS, D.M. 1974 "Fortran IV program to calculate air infiltration in buildings (computer program 37)
OTTAWA NRC of Canada, Div. Of building Res.
- 3) LARSEN, B.T. 1977 "Energy consumption of residential buildings"
OSLD : Building Research Institute
- 4) DE GIDS, W.F. 1978 "Calculation method for the natural ventilation of buildings"
Verwarm. Vent 35 : 7 (July 1978)
- 5) IRVING, S.J. 1979 "The Computer simulation of smoke movement during building fires"
Fire Prev. Sci. Tech. Vol 22
- 6) BLOMSTERBERG, Å.K. HARRJE, D.T. 1979 "Approaches to evaluation of air infiltration energy losses in buildings" ASHRAE Trans. 85 : 1, 1979
- 7) REEVES, G ; Mc BRIDE, M.E. ; SEPSY, C.F. 1979 "Air infiltration model for residences
ASHRAE Trans. 85 : 1, 1979
- 8) JANSSEN, J.E. ; PEARMAN, A.N. ; HILL, T.J. 1980 : Calculating infiltration : an examination of handbook models ASHRAE Trans. 86 : 2, 1980
- 9) COLE, ZAWACKI, ELKINS, ZIMMER, MACRISS 1980 :
Application of a generalized model of air infiltration to existing homes
Trans. ASHRAE 86 : 2, 1980

- 10) SHERMAN, M.H. ; GRIMSRUD, D.T. 1980 : Infiltration - pressurisation correlation : simplified physical modeling, Trans ASHRAE 86 : 2, 1980
- 11) ETHERIDGE, D.W. ; ALEXANDER, D.K. 1980
The British Gas multi-cell model for calculating ventilation
Trans. ASHRAE 86 : 2, 1980
- 12) SHERMAN, M.H. ; GRIMSRUD, D.T. 1980
Measurement of Infiltration using fan pressurisation and weather data
1st AIC Conf. 1980
- 13) WARREN, P.R. ; WEBB, B.C. 1980 : The relationship between tracer gas and pressurisation techniques in dwellings
1st AIC Conf. 1980
- 14) LIDDAMENT, M.W. 1982 : The role of mathematical modelling in the design of energy efficient ventilation systems, 3rd AIC Conf. 1982
- 15) LIDDAMENT, M.W. 1983 : The air infiltration center's program of model validation
Trans. ASHRAE 89 : 2B 1983
- 16) UVSLØKK, S. 1983. Field verification of the air infiltration model used in the computer program ENCORE
Trans. ASHRAE 89 : 2B 1983
- 17) MODERA, SHERMAN, LEVIN 1983
A detailed examination of the LBL infiltration model using the mobile infiltration test unit
Trans. ASHRAE 89 : 2B 1983
- 18) PERSILY, A.K. ; LINTERIS, G.T. 1983
A comparison of measured and predicted infiltration rates
Trans ASHRAE 89 : 2B 1983

- 19) CRALL, C.P. 1983 *Development of the air infiltration model for the energy performance design system*
Trans ASHRAE 89 : 2B 1983

- 20) WILSON, D.J. ; PITTMAN, W. 1983
Correlating measured infiltration for wind from a single direction
Trans ASHRAE 89 : 2B 1983

- 21) YOSHINO, H ; HASEGAWA, F ; UTSUMI, Y. 1984
Verification of calculation models of air infiltration using three types of test houses,
5th AIC Conf. 1984

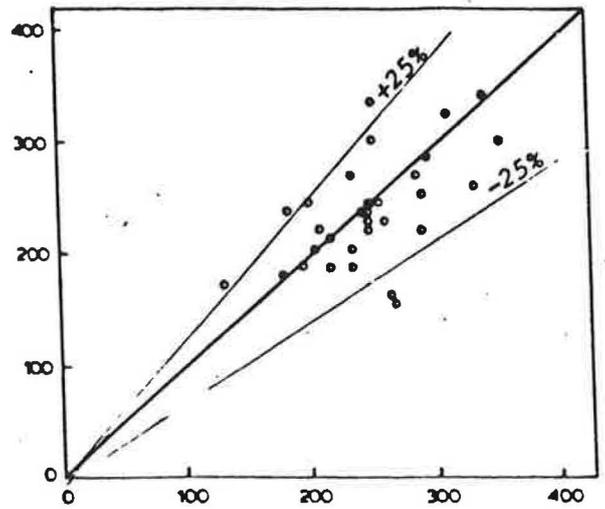
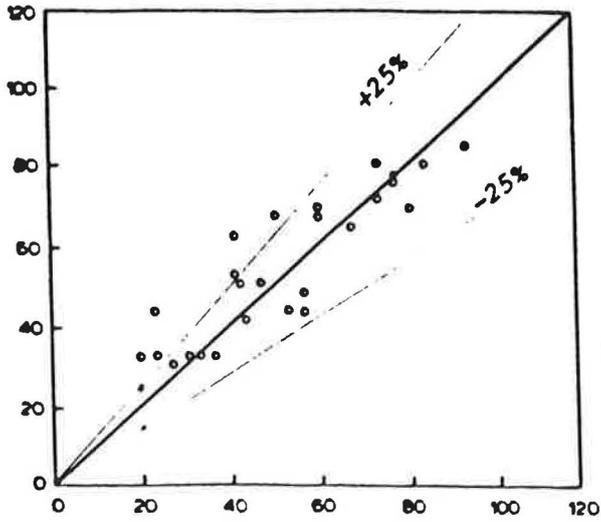


Figure 1 - Comparaison des résultats obtenus suivant le modèle IGT (9) et les expériences pour deux maisons individuelles.

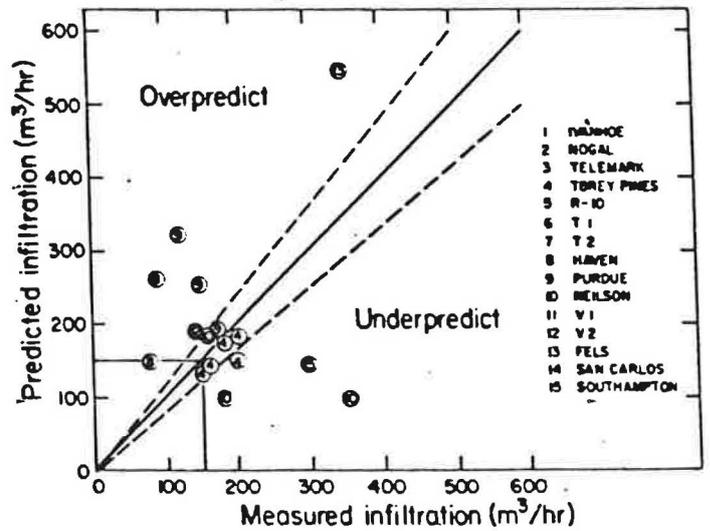
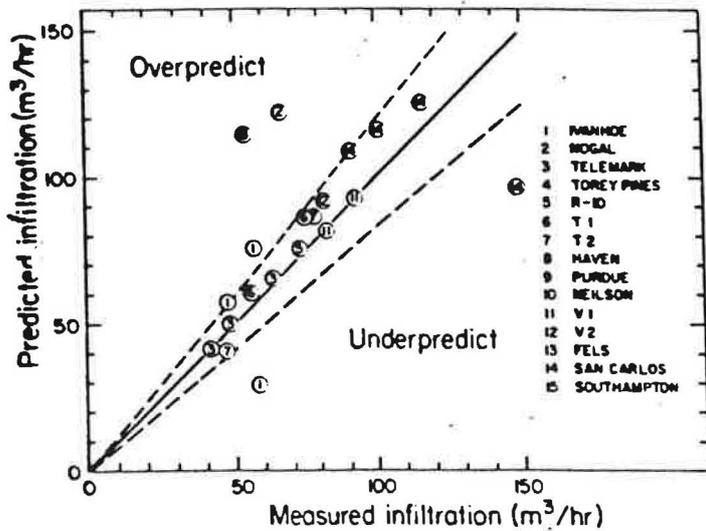


Figure 2 - Comparaison des résultats obtenus suivant le modèle LBL (10) et les expériences pour le cas des débits d'air faibles (a) et élevés (b)

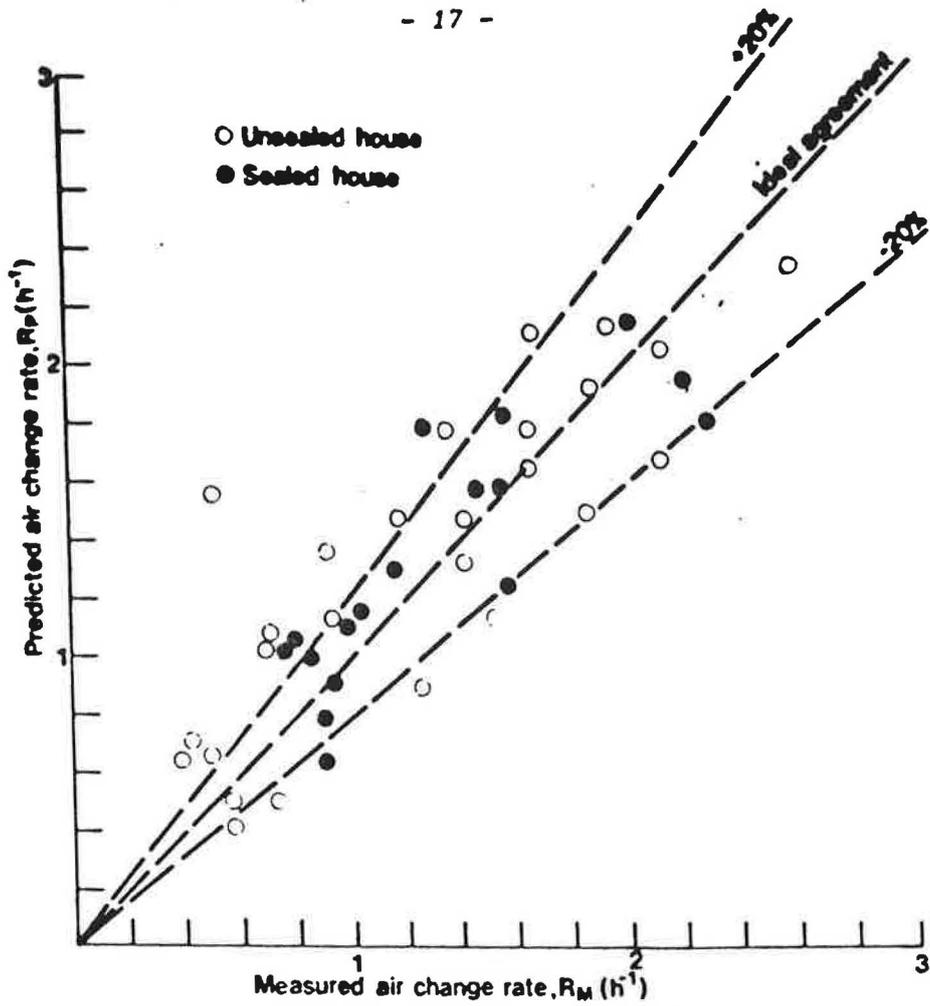


Figure 3 - Comparaison des résultats obtenus suivant le modèle de British Gas (11) et les expériences pour une maison normale et une maison très étanche

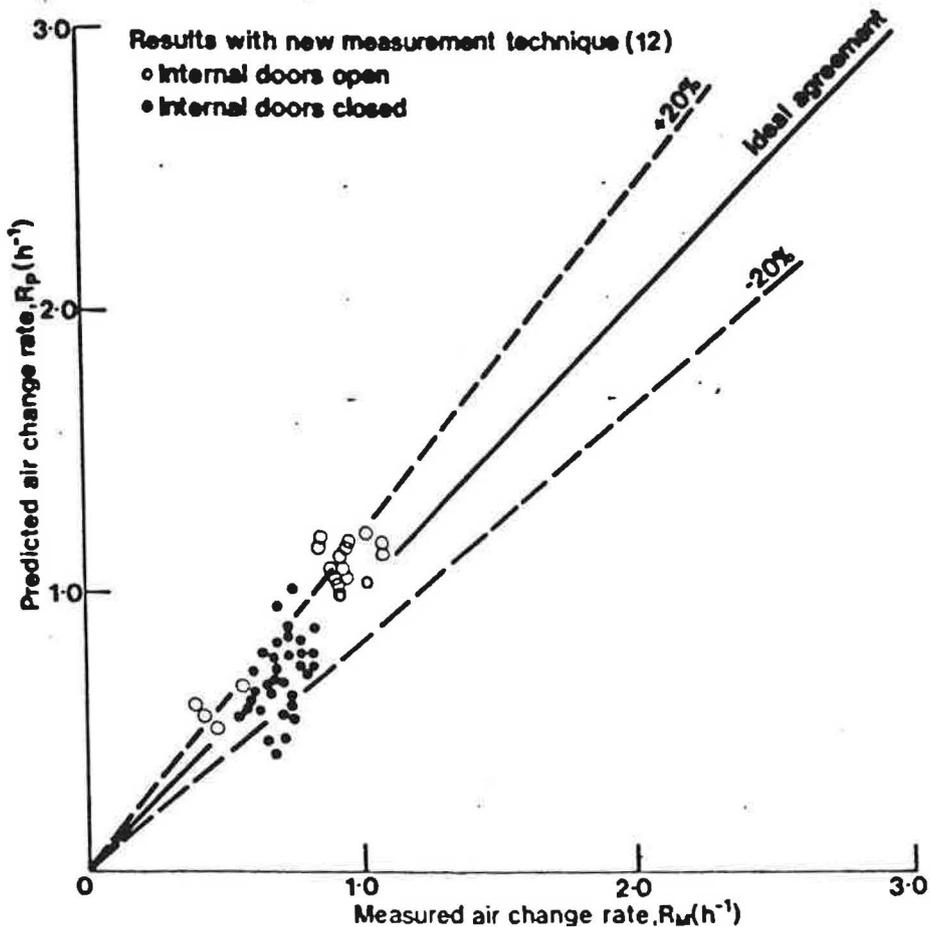


Figure 4 - Comparaison des résultats obtenus suivant le modèle de British Gas (11) et les expériences pour une maison

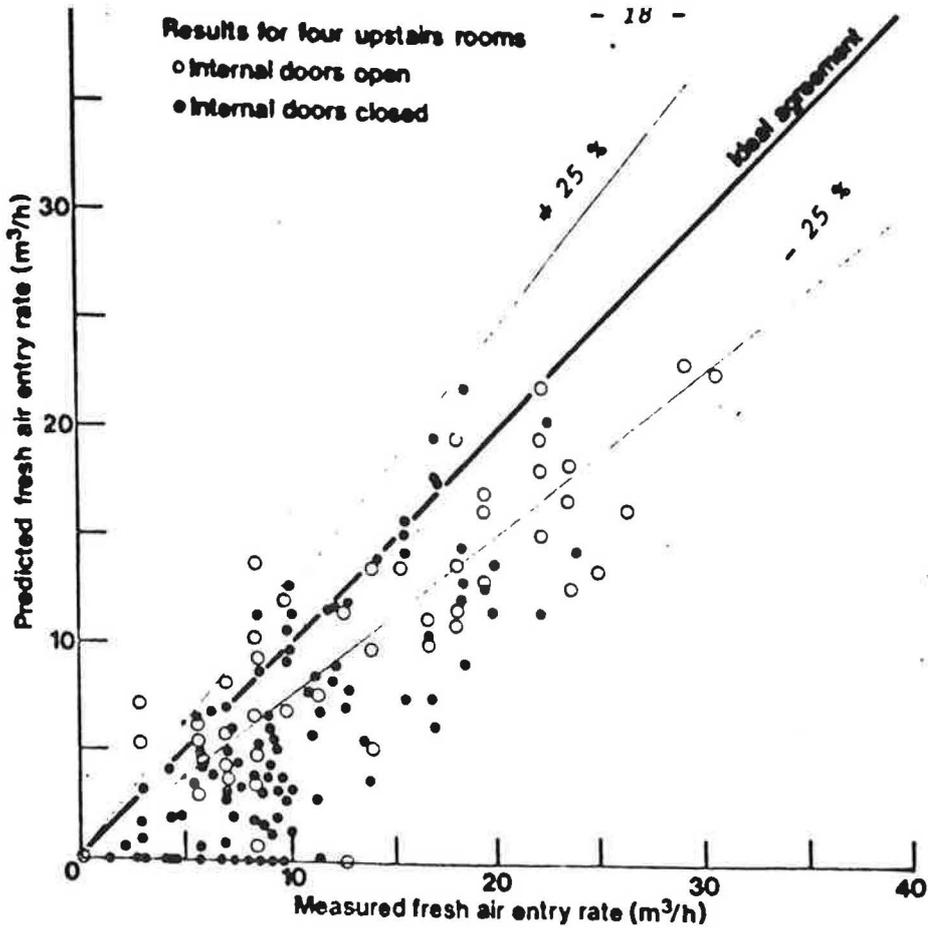


Figure 5 - Comparaison des résultats obtenus suivant le modèle de British Gas (11) et les expériences pour les quatre pièces d'une maison avec les portes intérieures ouvertes et fermées

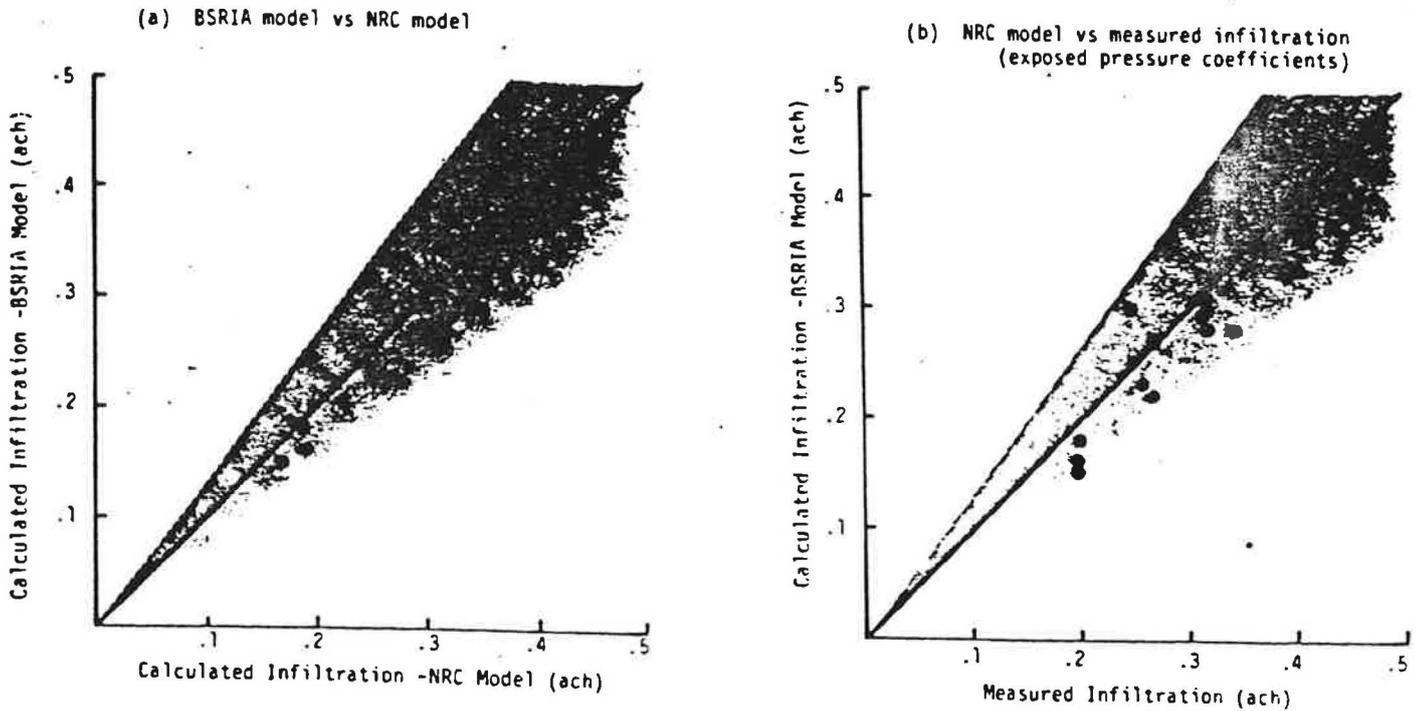


Figure 6 - Comparaison entre deux modèles (BSRIA (1) et NRC (2)) et avec l'expérience pour une maison en Suisse

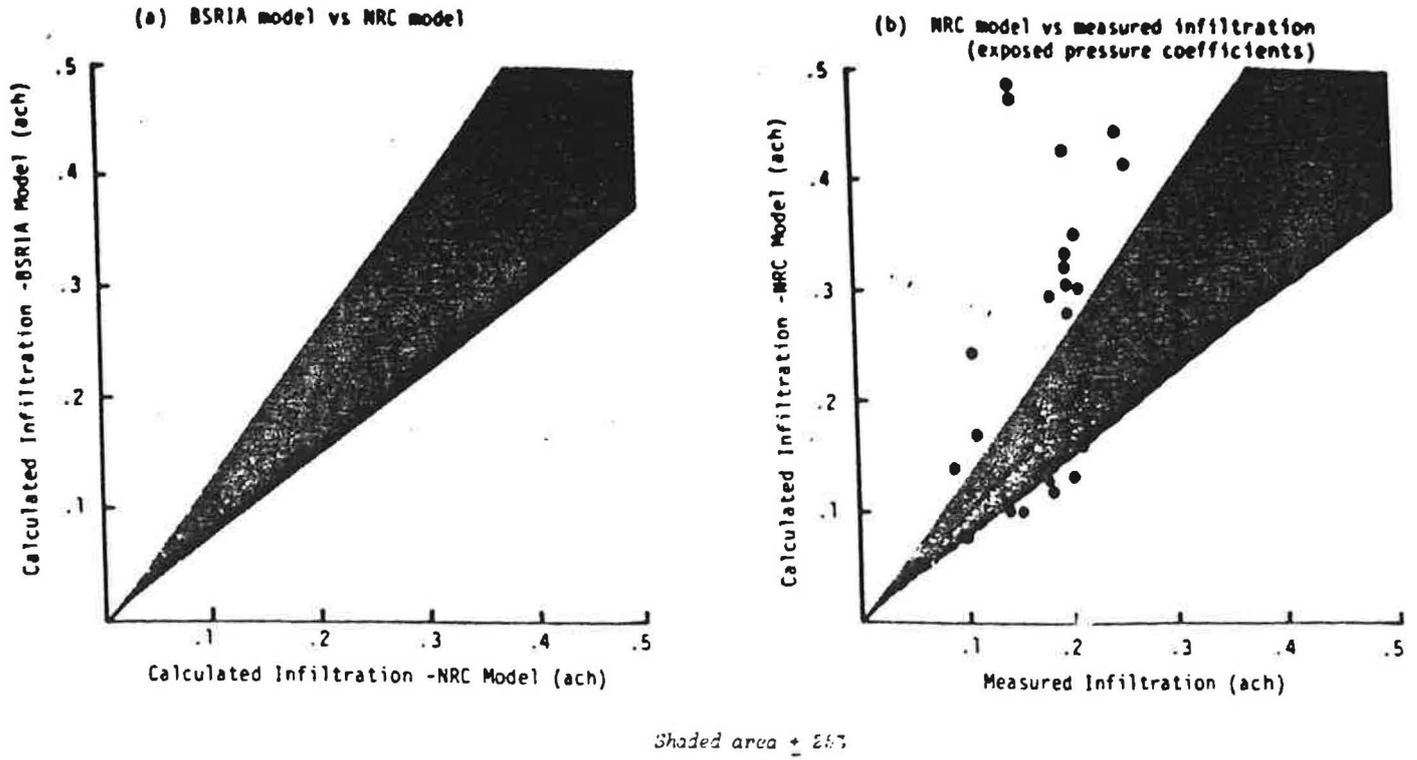


Figure 7 - Comparaison entre deux modèles (BSRIA (1) et NRC (2) et avec l'expérience pour une maison au Canada.

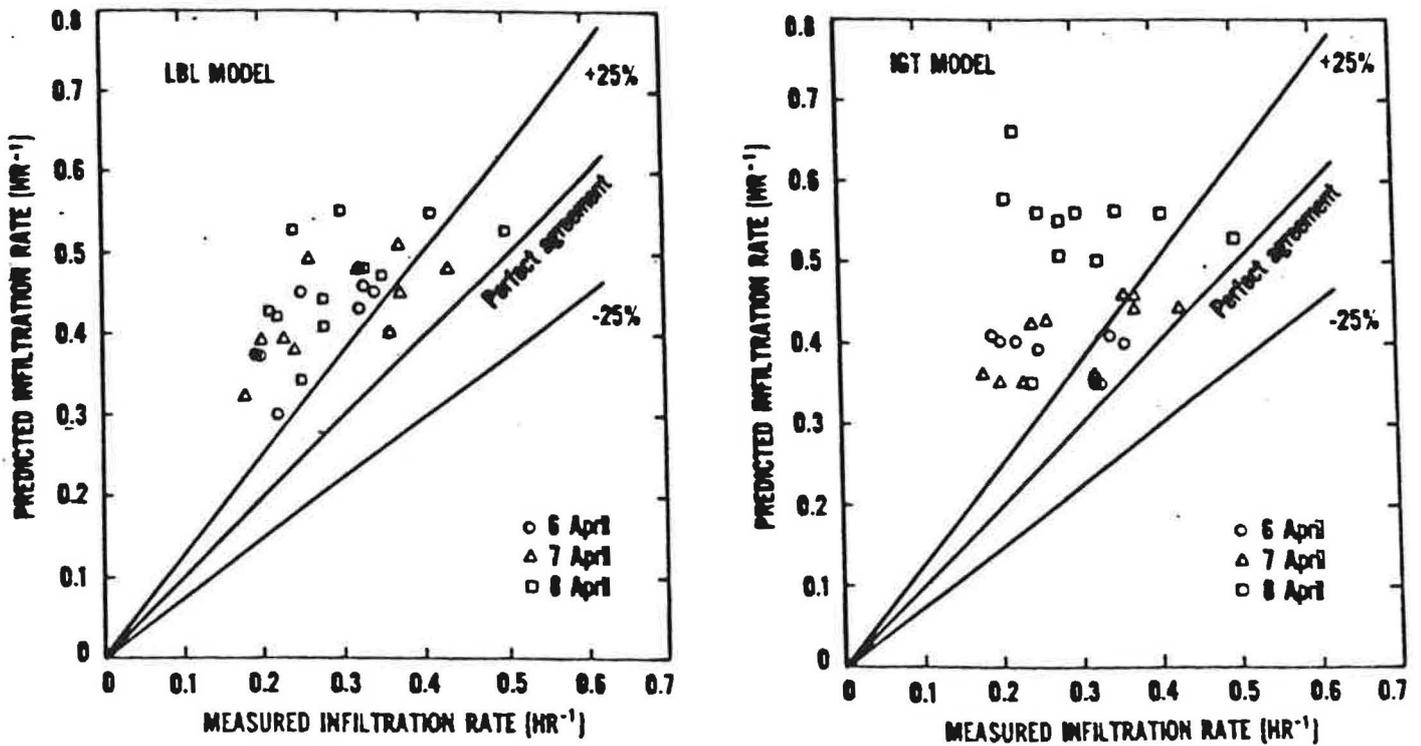


Figure 8 - Comparaison entre deux modèles (IGT (9) et LBL (10) et l'expérience pour une maison individuelle aux Etats Unis

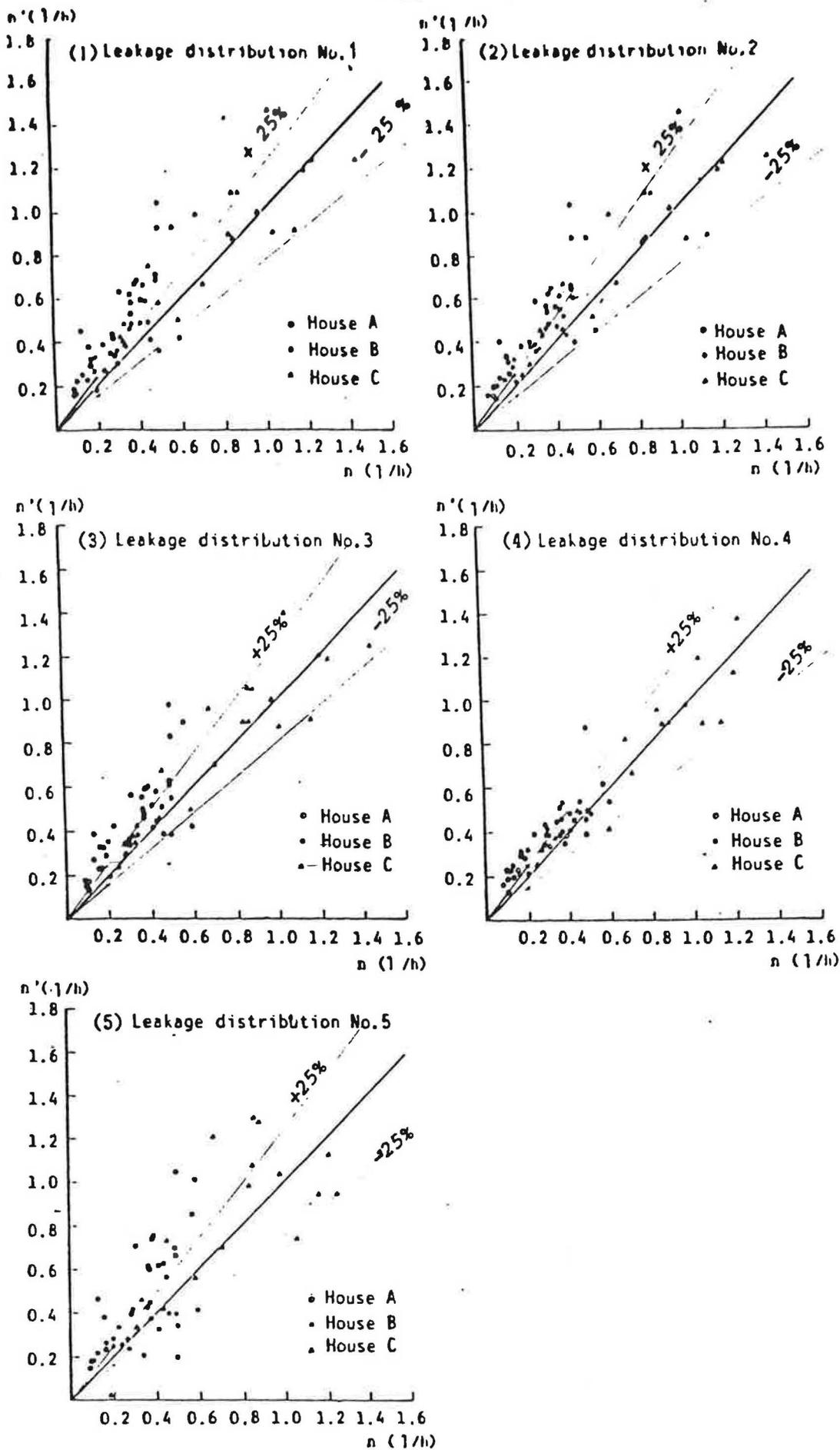


Figure 9 - Comparaison entre les résultats obtenus suivant un modèle japonais (21) et l'expérience pour trois maisons individuelles et pour cinq hypothèses différentes concernant les fuites.

LBL INFILTRATION MODEL

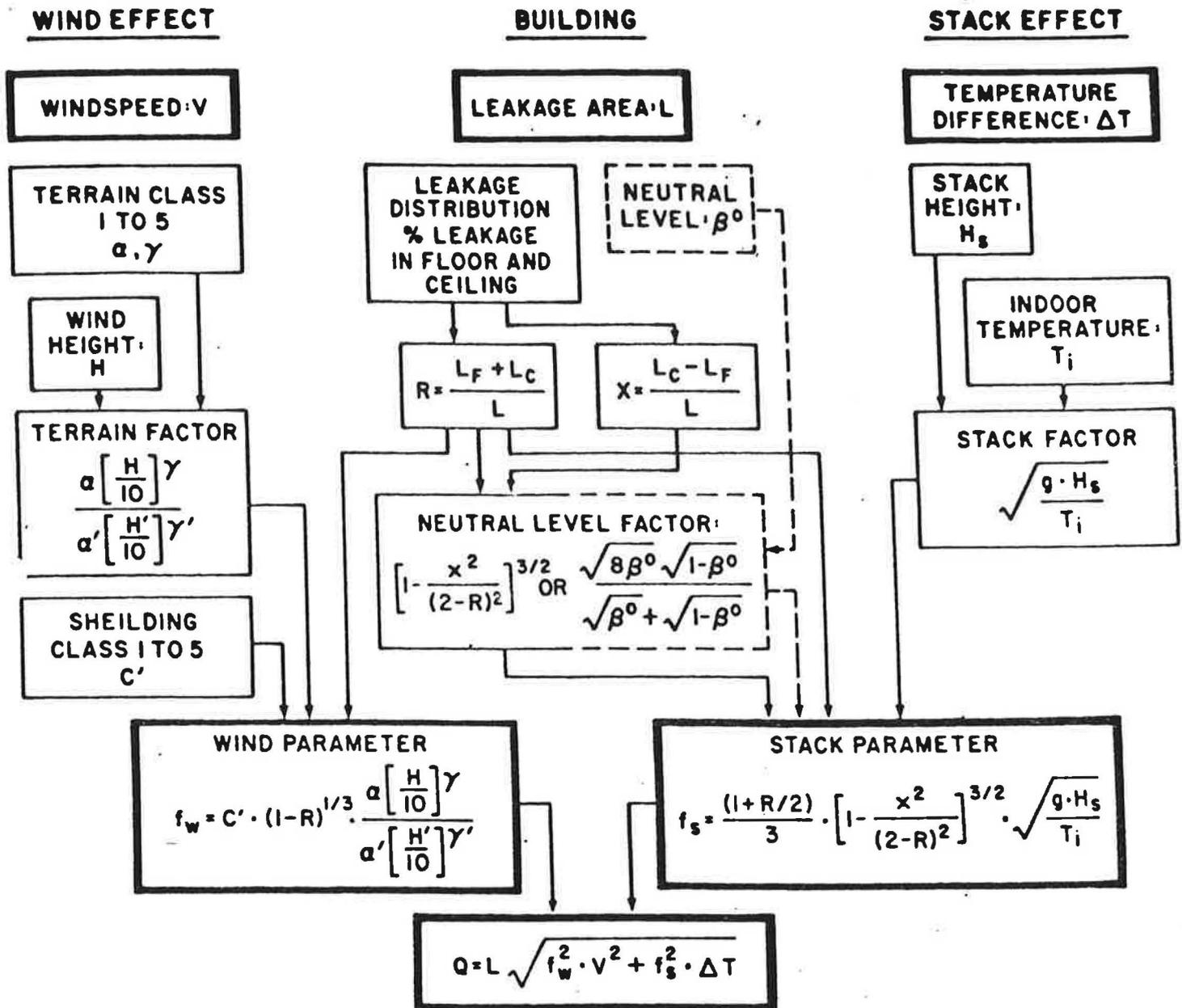


Figure 10 - Schéma du modèle L B L