

LIMITES DES MODELES EN PRESSION ET PERSPECTIVES

A. GADILHE ET B. FLEURY

E.N.T.P.E. / L.A.S.H.
Rue Maurice AUDIN
69518 Vaulx en velin CEDEX
FRANCE

Résumé :

Les modèles en pression multizones ont connu un fort développement ces dernières années. Suivant les conditions météorologiques et les modes opératoires de la ventilation, ils nous permettent une évaluation des mouvements entre les différentes pièces d'un logement, une connaissance de l'efficacité et de la qualité de la ventilation, ainsi que l'identification d'éventuels désordres pathologiques dans le bâtiment.

Malheureusement, ils reposent sur de nombreuses hypothèses et paramètres, difficiles à évaluer, qui limitent leur domaine d'application : connaissance de la distribution de la pression en façade, loi de comportement aéraulique de différents composants, quasi stationnarité des phénomènes, absence de couplage thermique-aéraulique, non prise en compte du comportement des occupants vis à vis des ouvrants,...

Nous nous proposons dans cet article d'analyser ces restrictions et d'identifier différents éléments de réponse pour étendre le champ d'application de ces modèles et les rendre plus réalistes et pratiques.

1 - INTRODUCTION

Les modèles en pression, permettant la détermination des débits d'air échangés entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment mais aussi entre les différentes zones aérauliques de ce bâtiment si le modèle est multizone, ont connu un fort développement durant ces dernières années. Les codes issus de nombreuses études et recherches ont été comparés pour des cas d'école simples. Liddament et Allen [1] concluent dans leur étude comparative des codes de calcul américains, anglais et canadiens que l'ensemble des modèles rassemblés fournit une bonne évaluation des taux de renouvellement d'air. Quatre codes de calcul français, AEROGAZ, BILBO, COSVENT et ICARE confrontés par Malo et Valton [2] dans une situation type fournissent des débits interzones ayant le même ordre de grandeur.

La simulation de l'aéraulique du bâtiment par les modèles détaillés plus ou moins simplifiés est séduisante pour l'optimisation et la conception de la ventilation d'un bâtiment [3] ainsi que pour l'étude de l'influence de l'état de perméabilité de l'enveloppe du bâtiment.

Cependant, les modèles utilisés à ce jour n'ont été que partiellement validés par ces comparaisons sur des cas d'école. Des validations expérimentales ont été entreprises malgré la difficulté de mise en oeuvre. En effet, il n'y a pas toujours adéquation entre les données existantes, météorologiques par exemple, et le phénomène étudié. Par ailleurs, il est délicat de décrire le bâtiment d'une façon correcte tant au niveau de l'action du vent que de la perméabilité. Cependant, nous pouvons citer l'expérience conduite par Valton [4,5] visant à suivre la concentration en hélium dans un pavillon et à la comparer au résultat des simulations de COSVENT. Le projet, en cours, de l'équipe du LESO [6] permettra non seulement de constituer une banque de données de perméabilité mais aussi de valider le programme FLOW. Les principales difficultés auxquelles se heurtent les expérimentateurs résident dans la bonne caractérisation des conditions limites du bâtiment : action du vent et perméabilité de l'enveloppe. La fiabilité des résultats obtenus grâce aux modèles en pression est liée à une bonne description du cas étudié plus qu'à l'algorithme mis en oeuvre dans le code.

Les résultats (débits, pression) des modèles en pression sont plus ou moins sensibles

- aux valeurs de coefficient pression : une variation de 20 % des coefficients de pression sur une façade peut entraîner une variation de 15 % du taux de renouvellement d'air [1].
- à la modélisation de la perméabilité, loi de comportement et valeur de la perméabilité. Selon le mode de fonctionnement du bâtiment, la valeur de la vitesse du vent, le fonctionnement ou non du système de VMC, et selon la typologie du logement (disposition des façades par rapport aux vents dominants) le taux de renouvellement d'air variera dans des proportions notables [7]

2 - POTENTIELS DES MODELES EN PRESSION

2.1 - Les applications actuelles

Les modèles en pression permettent de calculer pour un bâtiment donné et des conditions climatiques connues, les débits d'air échangés entre l'extérieur et l'intérieur, entre les différentes zones du bâtiment et également la pression moyenne régnant dans chacune des zones. La connaissance de ces débits nous renseigne sur plusieurs points :

- les déperditions thermiques par renouvellement d'air. L'évaluation forfaitaire du taux de renouvellement d'air à l'aide de règles de calcul peut être remplacée par un calcul sous les conditions météorologiques types et sur une période donnée.
- Le fonctionnement et l'efficacité de la ventilation dans des situations classiques. Les principes de la ventilation, cheminement de l'air des pièces de vie vers les pièces de service, respect du taux de ventilation minimum de chaque pièce de vie, peuvent être vérifiés pour diverses conditions météorologiques et divers débits d'extraction.

Nous ne détaillerons pas ici les principes de ces modèles, mais nous rappelons les principales hypothèses adoptées et les données nécessaires à la mise en oeuvre d'une simulation. Les principales hypothèses concernent :

- Les données climatiques
- Les coefficients de pression
- La perméabilité à l'air du bâtiment
- Le comportement des occupants
- Le couplage thermique

2.2 - Que pourraient-ils faire ?

Les modèles en pression ont un champ d'applications limité dans le monde du bâtiment. Ils ont été utilisés pour une meilleure connaissance des transferts aérauliques dans les situations courantes de fonctionnement d'un bâtiment.

Pour évaluer la pertinence de sa conception, le concepteur doit envisager également des conditions de fonctionnement correspondant à des situations peu courantes ou critiques. En effet, ce sont ces situations, qui bien qu'exceptionnelles, conditionnent l'appréciation de l'utilisateur concernant la qualité de l'ambiance intérieure dans laquelle il évolue.

La détermination des mouvements de l'air dans ces conditions marginales apporterait une nouvelle justification au développement de ces modèles. Voici quelques exemples d'applications potentielles :

- Comment sont les écoulements d'air dans un bâtiment lors de la présence de vents forts ? Des courants d'air froids sont-ils détectables ? Cette gêne momentanée ne va-t-elle pas conduire l'occupant à obstruer les bouches de ventilation pour une durée indéterminée ?

- Le fonctionnement concomittant de la cheminée d'agrément et du système de ventilation est-il concevable ? Quelles sont les perturbations engendrées ? Quelles sont les conséquences de la non fermeture de la trappe de la cheminée en dehors des périodes d'utilisation ?
- Le disfonctionnement d'un élément du système de ventilation peut-il engendrer une insécurité ou un danger ? (panne de l'extraction en VMC gaz). L'occupant percevra-t-il ou s'accomodera-t-il de la nouvelle ambiance olfactive créée ou bien agira-t-il impérativement sur le système de ventilation pour rétablir une situation sans danger ?
- La propagation des polluants (fumées, particules) dans un bâtiment peut-elle être évaluée avec une certaine confiance de façon à quantifier les conséquences d'un incendie, d'une émission importante de gaz toxiques,...

Les questions précédentes ne représentent que quelques enjeux dans le domaine de la gestion de l'air, mais leur élucidation permettrait peut-être de donner une meilleure image du système de ventilation et d'offrir un outil de calcul et d'évaluation au concepteur. Toutefois, pour que les modèles en pression puissent apporter une réponse satisfaisante à ces questions, des développements de la connaissance sont indispensables.

3 - LES DEVELOPPEMENTS NECESSAIRES

3.1 - Hypothèses de base

3.1.1 - Données météorologiques

Les données climatiques nécessaires aux modèles en pression sont la vitesse et la direction du vent, et la température extérieure. La plupart des stations météorologiques ne fournissent que des relevés trihoraires, alors que les modèles en pression calculent les taux de renouvellement d'air pour des pas de temps plus faible, 1 heure pour ESPAIR, 15 minutes pour FLOW par exemple. L'interpolation entre deux relevés pour la vitesse et la direction du vent est délicate : ces deux variables doivent-elles être traitées indépendamment, ou bien le raisonnement doit-il considérer le vent comme un vecteur ? Chacune des deux méthodes conduit dans des cas extrêmes à un résultat non satisfaisant. [8]

3.1.2 - Coefficients de pression

L'action du vent sur les façades d'un bâtiment est évaluée par le biais des coefficients de pression qui, le plus souvent, ne résultent pas de mesures in situ ou de tests en soufflerie du cas à étudier mais de lois déterminées par analyse de données issues de nombreuses études en soufflerie. Le plus souvent, une valeur moyenne unique du coefficient de pression est utilisée pour chaque façade du bâtiment.

Furbringer [8] a montré l'écart dramatique existant entre les valeurs des débits calculés par FLOW en utilisant d'une part les coefficients de pression mesurés en soufflerie et d'autre part en adoptant les valeurs de coefficient de pression prises par défaut par le code.

Les valeurs utilisées dans les différents modèles en pression, les valeurs issues d'essais en soufflerie et les valeurs des règles de calcul de structure sont très dispersées. Le choix de coefficients de pression adaptés au cas étudié est donc délicat [9].

L'analyse des cartographies de coefficients de pression issues d'étude en soufflerie à couche limite ou de modélisation numérique [10] montre que le coefficient de pression n'est pas constant sur une façade et qu'il varie avec la hauteur, de façon faible, et avec la position longitudinale de façon plus importante notamment près des angles du bâtiment (Fig. 1).

Les éléments perméables n'étant pas obligatoirement situés là où règne le coefficient de pression moyen de la façade, il paraît intéressant sous ce point de vue de modéliser la façade élément par élément en respect avec un zonage de coefficient de pression.

Par ailleurs, la confrontation des résultats obtenus soit en soufflerie soit par simulation numérique avec la réalité est rendue difficile par les écarts type importants observés sur le site. La question d'une détermination adéquate des coefficients de pression en vue d'une simulation aérodynamique est rendue encore plus complexe par les phénomènes de vent thermique qui peuvent prendre naissance si les vitesses de vent sont faibles [8]. D'autre part, le vent et par suite la pression en façade, sont des phénomènes fluctuants. Une moyenne effectuée sur un intervalle de temps donné est-elle suffisante si l'optique de la simulation aérodynamique est l'évaluer le confort des occupants ?

3.1.3 - Description du bâtiment

Les modèles en pression nécessitent l'identification des chemins de passage de l'air ainsi que la connaissance de la loi de comportement de ces différentes connections.

La description des chemins aérodynamiques peut être très fine, c'est à dire que les fissures, trous et ouvertures sont caractérisés géométriquement et aérodynamiquement, ou alors globale, les parois et les éléments d'une paroi sont alors décrits sommairement. Cette tâche complexe et fastidieuse est illusoire et irréalisable.

Comment pouvons-nous évaluer à priori l'état de la jonction entre la baignoire et le dormant ou celui du scellement de la cage d'escalier ? S'il existe une fissure, quelles sont ces caractéristiques et son évolution au cours du temps ? Afin de contourner cette difficulté, le bâtiment est modélisé suivant la perméabilité théorique des composants. Malheureusement, la qualité de la mise en oeuvre, la pertinence des lois proposées laissent souvent à désirer. La fiabilité des résultats obtenus est conditionnée par la qualité de l'information avec laquelle le code de calcul est alimenté.

La perméabilité parasite non identifiable, c'est-à-dire non répertoriée dans les défauts classiques, peut être très significative (fig. 2) [11].

La loi de comportement de certains composants peut être déterminée par des tests en laboratoire ou même quelquefois sur site mais l'identification de tous les chemins de passage de l'air est impossible.

Plusieurs tentatives de détermination de la loi de comportement de composants par soustraction de deux tests effectués avec la méthode de la porte CSTB ont été vouées à l'échec pour de multiples raisons : limites et précisions des appareils, perturbations multiples, ... [5, 12].

La perméabilité globale d'un bâtiment peut être connue aisément grâce à des essais en dépressurisation. Elle nous permet d'évaluer principalement l'impact énergétique des infiltrations mais n'autorise pas une analyse des mouvements interzones car se pose alors le problème de la distribution de la perméabilité sur la façade. Une répartition uniforme s'avère peu réaliste car ces entrées parasites sont principalement des défauts très localisés.

La caractérisation fine tout comme l'approche globale ne permettant pas une bonne connaissance de la circulation de l'air à travers un logement, nous proposons une méthode intermédiaire qui repose sur une caractérisation aéraulique fine des chemins privilégiés volontaires de passage de l'air : bouches, détalonnement, grilles, voire portes et fenêtres pour un test dans la gamme de ΔP de 0 à 50 Pascals et une caractérisation globale des composants entre pièces.

La perméabilité entre pièces peut-être évaluée par différentes méthodes (tests multiples de pressurisation, gaz traceur, dépressurisation locale). Les deux premières méthodes sont assez lourdes à mettre en oeuvre et nécessitent un traitement numérique important. La troisième méthode, en cours de développement au LCPC et au LASH, a déjà été tentée au CSTC. Sa mise en oeuvre souple permettra, nous l'espérons, de créer une banque de données de perméabilité parasite des composants séparateurs de deux zones.

Quelle que soit la méthode retenue, il convient d'enrichir notre base de connaissance sur les lois de comportement des cheminements de l'air.

Une autre difficulté dans la description d'un bâtiment est de connaître les perturbations engendrées par l'aménagement et le mobilier intérieur. Quelle est la modification de la résistance aéraulique engendrée par la présence de rideaux ou de meubles ? De plus, qu'advient-il des conceptions initiales lors de la vie d'un logement ? N'est-il pas fréquent de voir disparaître les détalonnements des portes suite à la pose de moquettes ou de carrelages ?

Le bâtiment est un objet vivant qui se dégrade (joint défaillant, retrait du béton, fissure, ...). Devons-nous modéliser le bâtiment dans un état figé ou essayer d'identifier son comportement futur ? Que de questions en suspens qui montrent la difficulté de la description de l'objet complexe qu'est un bâtiment.

3.1.4 - Loi de comportement

Le principe des modèles en pression consiste à calculer de façon itérative la pression moyenne régnant dans chaque zone définie comme ayant une pression quasi uniforme, afin d'en déduire par l'intermédiaire des lois de comportement des éléments réalisant des connexions entre les zones précédentes les débits aérauliques existants.

Nous pouvons distinguer quatre classes de connexions caractérisées par des lois de comportement distinctes :

- *Les orifices ou trous de section assez large*

L'écoulement dans ces orifices est turbulent et unidirectionnel. La mécanique des fluides permet de montrer que leur loi de comportement aéraulique est du type :

$$Q = C_d S \left(\frac{2 \Delta P}{\rho} \right)^{0.5}$$

Q débit volumique

S section de l'orifice

ΔP différence de pression de part et d'autre de l'orifice

C_d coefficient de décharge habituellement pris égal à 0.65

- *Les fissures*

Elles sont caractérisées par un diamètre hydraulique faible (la largeur de la fissure est petite devant sa longueur). Actuellement le comportement aéraulique de ce type de connexion est modélisé par :

$$Q = K \Delta P^n$$

K perméabilité sous 1 Pa de la fissure

n exposant de la loi de comportement

L'exposant varie entre 0.5 (cas des orifices et des écoulements pleinement turbulent) et 1 (cas des fissures pour lesquelles l'écoulement est laminaire). Habituellement, n est pris conventionnellement égal à 2/3.

Si la mécanique des fluides permet de justifier parfaitement les limites de variation de n, elle ne permet pas d'affirmer que pour toutes les fissures, la loi de comportement est identique quel que soit le nombre de Reynolds, c'est à dire le débit et par conséquent la dépression.

En effet, l'écriture des pertes de charges linéiques et singulières en fonction du nombre de Reynolds nous conduit à une loi de comportement de type quadratique [13] :

$$\Delta P = A Q + B Q^2$$

$$A = \frac{K_1 L \nu \rho}{l Dh^3}$$

$$B = \frac{2 \rho K_2}{Dh^2 l^2}$$

L profondeur de la fissure

l longueur de la fissure

Dh diamètre hydraulique

Cette équation peut être formulée en fonction du coefficient de décharge et du nombre de Reynolds sous la forme :

$$Q = C_d S \left(\frac{2 \Delta P}{\rho} \right)^{0.5}$$
$$\frac{1}{C_d^2} = \frac{K_1 L}{Re Dh} + K_2$$

En comparant la loi issue de la mécanique des fluides, loi quadratique, et la loi puissance, nous pouvons montrer que n varie avec la dépression et cela d'autant plus que la dépression est faible. En revanche, lorsque la dépression est supérieure à 20 Pa, les lois quadratique et puissance sont identiques (Fig. 3). Malheureusement, dans le bâtiment, les dépressions régnant de part et d'autre d'une paroi sont de l'ordre de 10 à 20 Pa pour des situations non extrêmes.

Une loi quadratique modélise de façon adéquate le comportement d'une fissure mais est peu adaptée au principe de résolution des codes de calcul en pression. Afin de contourner cette difficulté, la loi quadratique est réarrangée sous une forme puissance avec un exposant variable. Cet artifice permet une intégration facile dans l'ensemble des codes existants.

- Grande ouverture

A travers une grande ouverture, l'air peut circuler dans les deux sens. Si les températures de part et d'autre de l'ouverture sont connues et homogènes, les modèles inclus dans les codes en pression permettent une bonne évaluation des débits interzones [14].

Par contre, ils trouvent très vite leurs limites en présence de stratification ou d'évolution de la température. Par exemple, en hiver, l'ouverture d'une fenêtre s'accompagne d'un remplissage de la pièce rapide puis d'un destockage lent de la chaleur dans les murs de sorte que la température intérieure chute brusquement plus lentement [15]. Les conséquences énergétiques de l'ouverture des ouvrants ne peuvent donc pas être évaluées par les modèles existants puisque le couplage thermique et aéraulique n'est pas pris en compte. Pourtant, les déperditions associées peuvent représenter une part prépondérante dans le bilan énergétique annuel pouvant atteindre 40%. Les futurs modèles devront pouvoir s'accommoder d'un couplage thermique-aéraulique.

- Les composants des systèmes de ventilation et de chauffage

Les lois de comportement de ces composants tels que les bouches d'entrée d'air, les bouches d'extraction, le réseau aéraulique..., est en général donnée par le constructeur. Mais, la question de l'évolution du comportement aéraulique au cours du temps reste posée : une bouche autoréglable l'est-elle toujours ? Par ailleurs, comment se comporte-t-elle lorsque le logement est en surpression ? Comment prendre en compte le tirage naturel d'une cheminée d'agrément ?

3.1.6 - Comportement des occupants [16]

Les mouvements de l'air à l'intérieur d'un bâtiment sont largement influencés par l'état d'ouverture des ouvrants intérieurs et extérieurs. Une étude récente [17] a par exemple montré que, dans le cas d'un chauffage aéraulique, le taux d'infiltration peut être doublé si les portes intérieures sont closes. De même, une fenêtre ouverte dans une pièce de service induit le court-circuitage de l'air dans cette pièce.

La connaissance du comportement des occupants vis à vis des ouvrants extérieurs a reçu et continue de recevoir une attention toute particulière et de nombreuses études nous permettent d'entrevoir une simulation dynamique de ce comportement. Malheureusement, la connaissance de ce comportement vis à vis des ouvrants intérieurs est pour ainsi dire inexistante et devra être élucidée. Des propositions de recherches ont été émises à cet effet.

3.2 - Connaissances à acquérir

3.2.1 - Dynamique des phénomènes

Dans un bâtiment, interagissent plusieurs phénomènes dont la fréquence et la réponse est plus ou moins rapide : pression fluctuante du vent, mise en mouvement de l'air, démarrage d'un système de chauffage, stockage dans les murs. L'étude dynamique de ces phénomènes non maîtrisés conjointement à ce jour sera une voie privilégiée de recherche.

3.2.2 - Ventilation à travers une fenêtre

Comme nous l'avons vu précédemment, les mouvements de l'air à travers une fenêtre sous l'action d'un gradient thermique font l'objet de développements importants. Par contre, les débits d'air engendrés par l'action du vent à travers une seule ouverture dans une pièce ne sont pas encore appréhendés. En effet, ils résultent des fluctuations turbulentes du vent. Le couplage avec les phénomènes thermiques semble représenter un enjeu encore plus lointain.

3.2.3 - Ventilation d'été

Les modèles en pression ont aussi été utilisés pour étudier le confort d'été des occupants. Mais ici encore subsistent de nombreuses inconnues :

- les coefficients de pression ne sont plus valables si le taux d'ouverture est supérieur à 20% [18]. Quels coefficients choisir ?
- la vitesse de l'air est une variable fondamentale du confort d'été. Comment l'obtenir à partir des débits interzones ?
- Les individus ne sont-ils pas plus sensibles à la variation de la vitesse de l'air (intensité de turbulence) qu'à sa valeur moyenne ?

4 - CONCLUSION

Les modèles en pression offrent de nombreuses potentialités mais il convient quelquefois de prendre du recul et de réfléchir à leurs hypothèses fondamentales et à leurs limites car leur succès actuel pourrait conduire à une utilisation hors de leurs limites ce qui nuirait à leur crédibilité.

5 - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LIDDAMENT M., ALLEN C., "The validation and comparison of mathematical models of air infiltration.", Technical Note AIC 11, 1983.
- [2] MALO B., VALTON P., "Etude des modèles et simulation du renouvellement d'air dans les locaux.", Rapport intermédiaire rendant compte de travaux financés avec l'aide de l'A.F.M.E., Convention 6 04 0030, 1987.
- [3] TAHON C., "Etude et optimisation d'un système de chauffage aéraulique." Rapport de stage, 1987.
- [4] PROIX R., TAHON C., VALTON P., "Calage du logiciel AEROGAZ par des mesures expérimentales de concentration d'hélium.", COSTIC, Septembre 1987.
- [5] VALTON P., LABERDESQUE C., NILLE T., "Etude de sensibilité aux paramètres des modèles de simulation de la ventilation.", Rapport final, commande DETN n° 723262, 1988.
- [6] PROGRAMME DE RECHERCHE : AÉRAULIQUE DES ASPECTS ÉNERGETIQUES DU BATIMENT. "Programmes de calcul détaillés et simplifiés des échanges d'air dans le bâtiment, validation à l'aide de mesures expérimentales.", Séminaire, Novembre 1988.
- [7] GADILHE A., "Rapport d'avancement de thèse", à paraître
- [8] FURBRINGER J.M., COMPAGNON R., ROULET C.A., "How to validate a multizone air infiltration program.", 10th AIVC Conference, Espoo, Finland, September 1989.
- [9] GADILHE A., "Coefficients de pression et mouvement d'air à l'intérieur du F3 du bâtiment expérimental du CERUG.", Rapport d'avancement au 1 Mars 1988.
- [10] GADILHE A., FLEURY B., "Wind pressure coefficients : A comparison between PHOENICS and wind tunnel results.", 3rd International PHOENICS user conference, Dubrovnick, 1989.
- [11] FLEURY B., GADILHE A., "Experimental study of air flow patterns in a three bedroom house.", 10th AIVC Conference, Espoo, Finland, September 1989.
- [12] KHALIL N., "Etude des mouvements de l'air à l'intérieur d'un F4.", Travail de fin d'études, ENTPE, Juin 1989.
- [13] GADILHE A., FLEURY B., "Air flow through cracks : A bibliography review.", Clima 2000, Sarajevo, August 1989.

- [14] PELLETRET R., KHODR H., "A new model to compute air distribution.", *Clima 2000*, Sarajevo, August 1989.
- [15] VAN DER MAAS J., ROULET C.A., HERTIG J.A., "Some aspects of gravity driven air flow through large apertures in buildings.", *ASHRAE Trans.* 1989, Vol. 95, Part 2.
- [16] FLEURY B., ADOLPHE L., "Comportement des usagers vis à vis de l'ouverture des fenêtres.", *Rapport d'étude, contrat E.D.F n° E 12/L 20*, Juin 1989.
- [17] CUMMINGS J.B., TOOLEY J.J., "Infiltration rates and pressure differences in Florida homes caused by closed interior doors when the central air handler is on.", 14th National Passive Solar Conference, Denver, June 1989.
- [18] VICKERY B.J., BADDOUR R.E, C.A. KARAKATSANIS, "A study of the external wind pressure distributions and induced internal ventilation flow in low-rise industrial and domestic structures.", Florida Solar Energy Center, Report BLWR-SS2-1983, January 1983.

6 - FIGURES

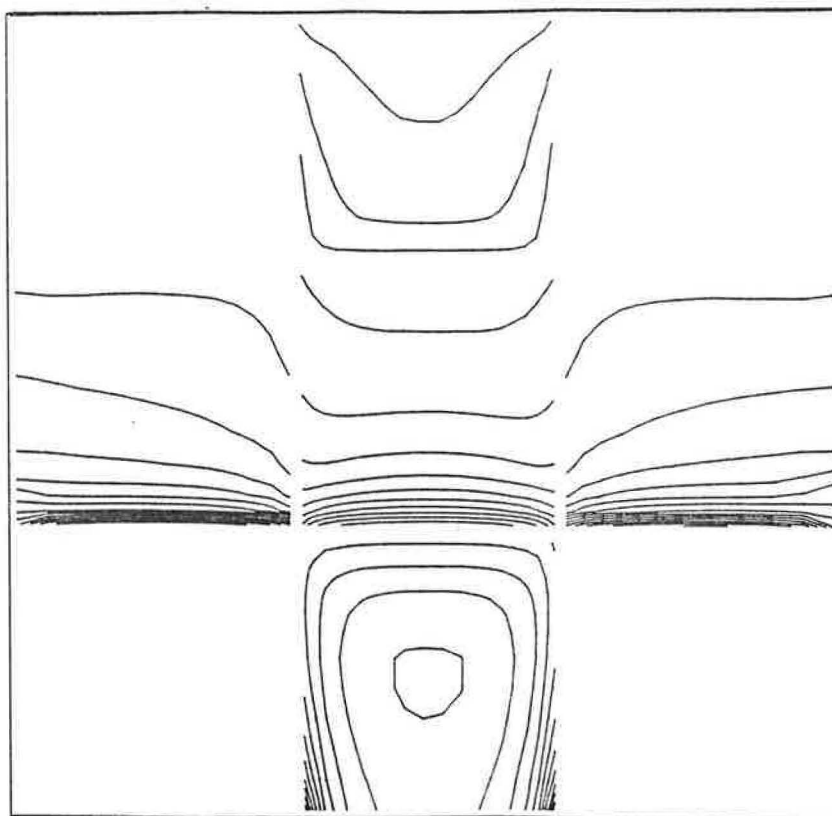
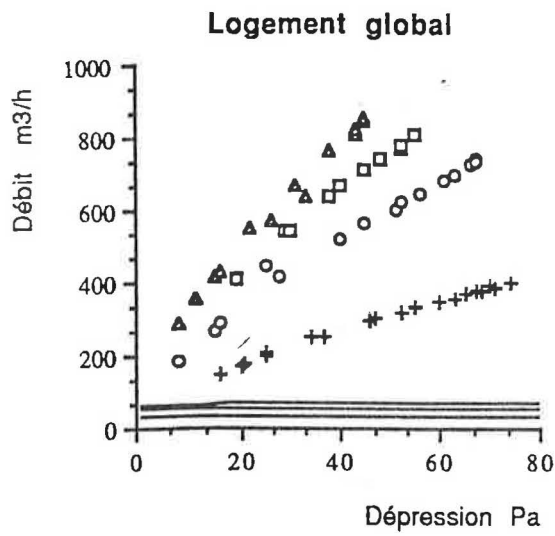


Figure 1 : Lignes d'isocoefficient de pression - Simulation numérique



- + Toute connexion détectable colmatée
- Volet roulant et bouche d'entrée d'air colmatés
- Entrée d'air colmatée
- ▲ Tout décomaté

Figure 2 : Résultats de tests en dépressurisation

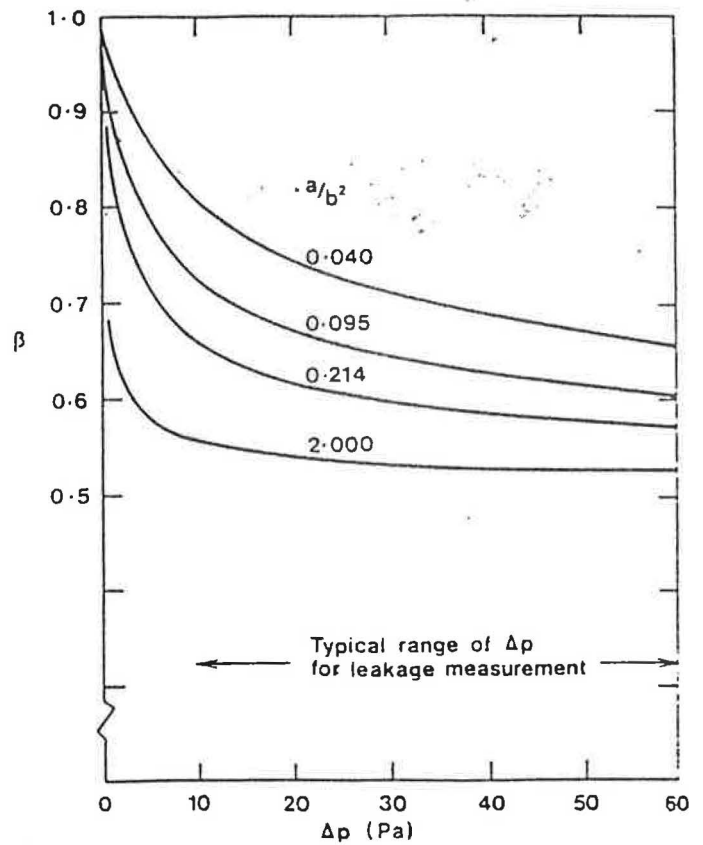


Figure 3 : Variation de n en fonction de ΔP