

**Modélisation numérique des transferts aérauliques  
au sein de bâtiments multizones équipés  
de leur système de ventilation**

**A.C. MEGRI, F. ALLARD, G. KRAUSS  
CETHIL - URA CNRS 1372**

**Bât.307 - INSA - 69621 VILLEURBANNE CEDEX (FRANCE)**

**Résumé :**

La prédiction des transferts aérauliques au sein des bâtiments multizones est encore aujourd’hui un problème ardu, surtout si l’on veut tenir compte des systèmes de ventilation ou de climatisation qui les équipent.

Ce thème a motivé le projet COMIS qui s'est déroulé pendant un an à Berkeley d'Octobre 88 à Octobre 89. Un des principaux résultats de ce travail a été une première version d'un code numérique permettant de prédire les transferts aérauliques au sein de bâtiments multizones.

L'intégration des systèmes de ventilation au sein de ce code a fait l'objet d'une recherche menée depuis au sein du CETHIL. A partir d'une décomposition des réseaux de ventilation en composant élémentaires modélisés indépendamment (bouches, gaines, jonction, ventilateurs...), ceux ci sont superposés à la structure du bâtiment et l'ensemble est alors simulé de façon couplée.

Après une brève description des méthodes utilisées, nous montrons sur un exemple concret d'un bâtiment équipé de son système de ventilation les résultats obtenus à l'aide de ce principe de couplage.

Dans un deuxième temps une étude de sensibilité nous permet d'identifier les paramètres importants qui conditionnent les transferts aérauliques dans les bâtiments multizones équipés de systèmes de ventilation.

### Nomenclature :

$Re$	nombre de Reynolds.
$Q_e$	débit estimé dans les gaines (débit de l'itération précédente) [ $m^3/s$ ].
$Q_a$	débit alternatif calculé à partir de $Q_e$ [ $m^3/s$ ].
$\Delta P_{te}$	perte de pression totale correspondante au débit $Q_e$ [Pa].
$\Delta P_{ta}$	perte de pression totale correspondante au débit $Q_e$ [Pa].
$\rho_M, \rho_N$	masse volumique de l'air dans les zones M et N respectivement [ $kg/m^3$ ].
$V_i, V_j$	vitesse de l'air aux points i et j respectivement [ $m/s$ ].
$C$	caractéristique de la perméabilité du lien considéré [ $m^3/s.Pa^N$ ].
$N$	exposant variant selon le type d'écoulement et la nature de la liaison.
$N_i$	vitesses de rotation du ventilateur [tr/mn].
$C_i$	coefficients du polynôme d'approximation du lien considéré [ $m^3/s.Pa^i$ ].
$n$	degré du polynôme d'approximation de débit d'un lien considéré.
$K$	coefficient de correction du débit dans les fissures.

### 1.- Introduction :

La tendance actuelle vers des codes de calcul plus fidèles de la réalité physique pour prédire les transferts aérauliques au sein des bâtiments multizones est due non seulement à des efforts consacrés aux économies d'énergie mais aussi essentiellement aux problèmes de qualité de l'air et de confort thermique et acoustique.

La plupart de ces modèles prennent en compte les trois moteurs de la ventilation à savoir, le vent, le tirage thermique et le système de ventilation mécanique. Ces trois effets sont représentés par des modèles plus ou moins simples, partant de modèles très simplifiés jusqu'à des modèles beaucoup plus détaillés [1] à [6].

Par ailleurs l'analyse de l'interaction des systèmes de ventilation ou de conditionnement d'air avec le bâtiment est rarement étudiée, pour des raisons diverses telles que le manque de données et l'incompatibilité des méthodes d'analyses des différents éléments [7].

En choisissant un modèle de couplage intégré du système de ventilation avec le bâtiment, notre démarche est basée sur la définition de lois simples, compatibles entre elles et qui représentent au mieux et avec précision chaque composant aéraulique.

L'intérêt de notre travail est de connaître d'avantage certains phénomènes complexes résultant du couplage entre le bâtiment et son système de ventilation.

### 2.- Modélisation aéraulique du bâtiment avec son système de ventilation :

Le support de notre étude est le modèle aéraulique multizone COMIS [6], [8], [9]. COMIS est un modèle dans lequel le bâtiment et le système de ventilation sont représentés par un ensemble de noeuds reliés entre eux par différents types de liaisons

(trous, ventilateurs, etc) ; chaque noeud représente un espace intérieur ou extérieur à pression constante.

Du point de vue modélisation, le bâtiment ainsi que son système de ventilation sont traités par couplage par l'intermédiaire de relations débit-pression. Pour des entités différentes (fissures, gaines, ventilateurs, etc), ces relations sont basées sur le même principe physique. Dans la suite pour faciliter la compréhension, nous allons les présenter indépendamment.

Pour définir ces relations débit-pression, trois étapes sont nécessaires:

- détermination des coefficients de ces relations débit-pression.
- calcul de la différence de pression à travers les différents composants, en utilisant l'équation de Bernouilli [10].
- correction de ces relations débit-pression.

## **2.1.- Enveloppe du bâtiment :**

L'enveloppe du bâtiment est traversée par l'air par des éléments prévus à cet effet tels que les extracteurs et les bouches et aussi par des ouvertures involontaires qui peuvent être dues à différentes causes [11]:

- défauts de conception.
- défauts qui se créent au cours du temps tels que les fissures dues à des contraintes mécaniques telles que la traction et à des contraintes thermiques.

Pour une fissure spécifique, la loi du débit volumique en fonction de l'écart de pression entre les deux zones séparées par la fissure est de la forme [6]:

$$Q = K \cdot C (\Delta P)^N \quad (1)$$

Les coefficients C et N sont déterminés expérimentalement [12], [13], et par la suite corrigés en fonction des caractéristiques thermiques et aérauliques de la fissure.

La valeur de Q représente le débit traversant l'élément considéré, si cette fissure l'occupe seule.

## **2.2.- Modélisation du système de ventilation :**

Nous allons caractériser les éléments aérauliques principaux d'un réseau de ventilation et de conditionnement d'air soit [8], [9]:

- les gaines rectilignes.
- les singularités.
- les ventilateurs.
- les tés ou éléments de jonction du réseau.
- les contrôleurs de débit tels que les bouches d'entrées d'air autoréglables, les bouches d'extraction autoréglables, les volets, et les régulateurs.

### 2.2.1.- Calcul des coefficients des lois de débit :

#### 2.2.1.1.- Gaines rectilignes et singularités :

Pour faciliter les calculs du réseau, la relation entre les pertes de charge et le débit volumique est exprimée par une loi de type puissance.

Les coefficients C et N sont calculés pour chaque itération de la manière suivante:

Initialement le débit et la vitesse sont inconnus. Donc pour éviter de donner un débit estimé pour chaque composant, on suppose initialement que la vitesse de l'air dans les différentes gaines est égale à n'importe quelle valeur initiale de vitesse. Il est recommandé d'utiliser une valeur comprise entre 6 et 8 m/s [14]. Au cours des itérations le débit volumique à travers une gaine est pris égale au débit calculé à l'itération précédente ( $Q_e$ ).

- pour le cas d'une gaine rectiligne, on calcule le coefficient de perte de charge avec la formule de Hagen-Poiseuille pour un écoulement laminaire ( $Re < 2300$ ), et avec l'équation de Moody pour un écoulement turbulent, sans avoir à déterminer si la paroi de la gaine doit être considérée comme lisse ou rugueuse.

- pour le cas d'une singularité, on calcule le coefficient de perte de charge singulière à partir de corrélations établies grâce à une analyse des données fournies par la bibliographie.

- on calcule la perte de charge totale pour chaque composant  $\Delta P_{te}$ .

- un débit volumique alternatif est automatiquement calculé  $Q_a$ . La valeur de ce débit est supérieure de 10 % à la valeur  $Q_e$  estimé précédemment dans le cas de l'écoulement turbulent et inférieure de 10 % à celui-ci pour le cas de l'écoulement laminaire [6].

Pour ce nouveau débit, on refait les mêmes calculs que précédemment pour déterminer la perte de charge totale de chaque composant  $\Delta P_{ta}$ .

Lorsque le nombre de Reynolds est compris entre 2300 et 3500, le régime d'écoulement est mal défini (régime transitoire) et il existe une certaine incertitude sur la perte de charge correspondante. On calcule le coefficient de Darcy par interpolation entre les valeurs limites des modes d'écoulement laminaire et turbulent.

Finalement, le coefficient de débit C et l'exposant N sont obtenus par:

$$N = \frac{\log(Q_a) - \log(Q_e)}{\log(\Delta P_{ta}) - \log(\Delta P_{te})} \quad (2)$$

$$C = \frac{Q_a}{(\Delta P_{te})^N} = \frac{Q_a}{(\Delta P_{ta})^N} \quad (3)$$

Le débit volumique traversant une gaine est calculé par :

$$Q = C(\Delta P)^N \quad (4)$$

Le coefficient C est ensuite corrigé en fonction des caractéristiques réelles de l'air à l'intérieur de la conduite.

#### 2.2.1.2.- Confluences et bifurcations :

Une jonction est représentée par trois noeuds de pression et traitée comme un noeud particulier par le modèle COMIS. Ceci veut dire que la pression statique de la jonction au noeud avec le plus grand débit (le noeud 1 de la figure 1 par exemple) est calculé d'une manière itérative. Avec cette pression et en utilisant la relation de la perte de charge, on calcule les pressions statiques des deux autres noeuds.

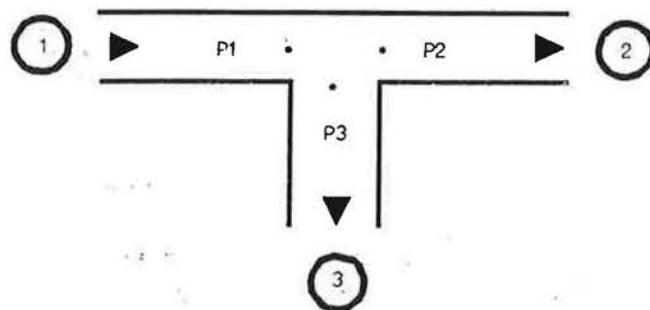


Figure 1 : représentation d'une jonction

Pour une jonction six configurations peuvent se présenter.

Type de configuration :	Schéma :
séparation en T	
réunion en T	
réunion de courants, rectiligne	
réunion de courants, latérale	
séparation de courants, rectiligne	
séparation de courants, latérale	

### 2.2.1.3.- Ventilateurs:

Dans un écoulement théorique sans pertes, les courbes débit-pression sont des droites. Mais dans un écoulement réel, les différentes pertes modifient considérablement ces droites. Pour un ventilateur donné, il existe une courbe, déterminée expérimentalement, pour chaque vitesse de rotation N.

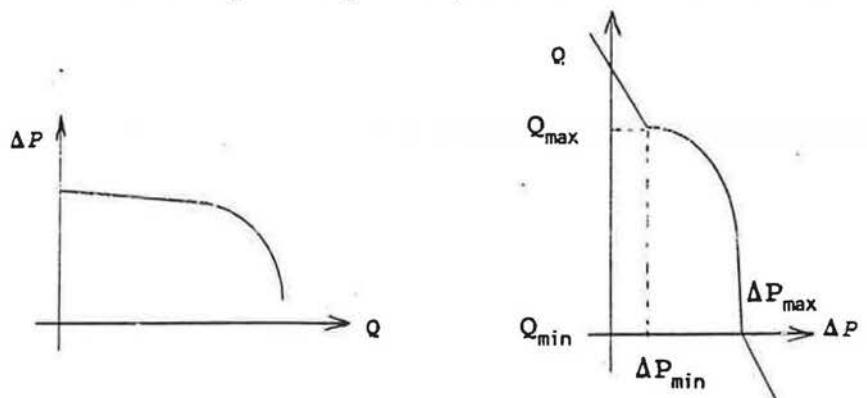
Pour une compatibilité avec les autres modules, on prend dans notre modèle la courbe pression-débit ( $Q = f(\Delta P)$ ) (figure 2-b) au lieu de prendre la courbe débit-pression ( $\Delta P = f(Q)$ ) donnée par le constructeur (figure 2-a).

$$Q = C_0 + C_1 \Delta P + C_2 \Delta P^2 + \dots + C_n \Delta P^n \quad (5)$$

A partir d'un certain nombre de couples débit-pression, la courbe caractéristique d'un ventilateur est approximée par un polynôme, dont les coefficients sont obtenus par la méthode des moindres carrés.

En dehors du domaine de validité de la courbe caractéristique défini par l'intervalle  $[\Delta P_{\min}, \Delta P_{\max}]$ , la loi débit-pression du ventilateur est représentée par une droite passant par les points  $(\Delta P_{\min}, Q_{\max})$  et  $(\Delta P_{\max}, Q_{\min})$ . (figure 2-b).

Pour tenir compte de l'effet de la densité de l'air et de la vitesse de rotation du moteur sur le débit volumique et la pression, les lois du ventilateur sont alors corrigées [6].



(2-a) : la courbe caractéristique      (2-b) : le modèle

Figure 2 : le modèle ventilateur

### 2.2.1.4.- Contrôleurs de débits :

Les contrôleurs de débit représentent la plupart des volets et régulateurs (volets, clapets, bouches et grilles de soufflage et d'extraction...) utilisés en façade ou dans les systèmes de distribution de l'air.

Le principe d'un contrôleur de débit est le suivant : un clapet asservi à l'écart de pression entre l'amont et l'aval du contrôleur modifie la section de passage de l'air. Plus l'écart de pression augmente plus le clapet se ferme afin de maintenir constant le débit de l'air circulant dans la gaine.

Dans le cas des bouches autoréglables le but principal est de limiter au maximum la ventilation transversale inévitable avec des entrées d'air fixes (ce qui est en contradiction avec la maîtrise de l'énergie). Ce phénomène est d'autant plus accentué dans le cas d'un bâtiment à double exposition et soumis à vent fort. L'entrée d'air de la façade au vent (en pression) laisse entrer un maximum d'air, alors que celle de la façade sous le vent (en dépression) laisse échapper une quantité non négligeable qui vient s'ajouter à la perméabilité du bâtiment d'où la nécessité d'avoir de bonnes entrées d'air autoréglables évitant une entrée d'air excessive sur la façade en pression. Avec ce raisonnement, on peut dire que l'entrée d'air située sous le vent favorise la perméabilité de la façade en pression [15].

Une des applications des bouches autoréglable consiste à moduler automatiquement ce renouvellement d'air en fonction de la concentration des différentes zones. La modulation des débits par ce procédé est de type "tout ou peu". Lorsque la concentration est inférieure au seuil de réglage, le registre est fermé, l'air est évacué par un orifice fixe [16] à [18].

Pour que la fonction d'un contrôleur de débit soit respecté, il faut que la caractéristique débit-pression du contrôleur de débit au niveau du modèle soit la plus proche possible de sa caractéristique réelle et ceci par l'introduction d'un nombre important de couples de données.

Compte tenu de leur comportement on distingue quatre types de contrôleurs de débit :

- contrôleur de débit symétrique et idéal (F1).
- contrôleur de débit non symétrique et idéal (F2).
- contrôleur de débit symétrique et non-idéal (F3).
- contrôleur de débit non symétrique et non-idéal (F4).

Pour chaque type, on peut représenter le comportement du contrôleur de débit par des lois de puissance (domaine 1+ et 1-) et des lois polynomial (domaine 2+, 2- et 3+, 3-).

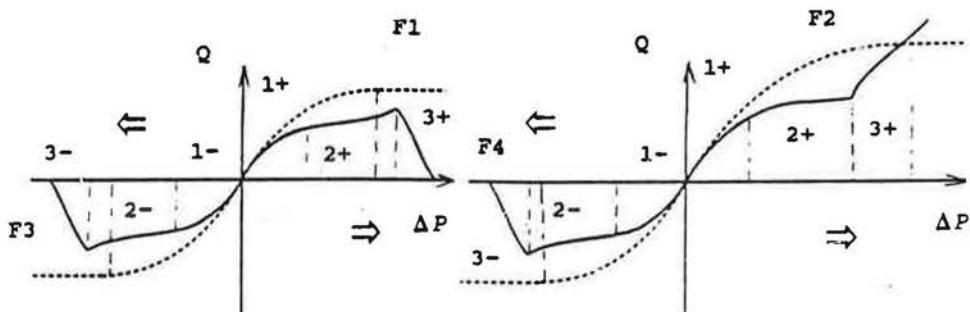


Figura 3 : les courbes caractéristiques des contrôleurs de débits

### 2.2.2.- Calcul de la différence de pression à travers les liens :

Dans le cas général, l'effet de la vitesse du vent, le tirage thermique ainsi que l'effet du système de ventilation mécanique agissent ensemble. L'équation de Bernouilli

nous permet de décrire cette combinaison des différents effets. Pour une liaison  $ij$  entre deux zones M et N, on peut écrire :

$$\rho_M \frac{V_i^2}{2} + P_i + \rho_M g Z_i = \rho_N \frac{V_j^2}{2} + P_j + \rho_N g Z_j + \Delta P_{ij} \quad (6)$$

Si on exprime  $p_i$ ,  $p_j$  en fonction de  $P_N$  et  $P_M$ , les deux pressions de référence des deux zones, on obtient :

$$\begin{aligned} P_i &= p_i + \rho_N g Z_N \\ P_j &= p_j + \rho_M g Z_M \end{aligned} \quad (7)$$

La substitution des deux équation (7) dans l'équation (6) on aura :

$$\Delta P_{ij} = (P_i + \rho_M \frac{V_i^2}{2}) - (P_j + \rho_N \frac{V_j^2}{2}) + \rho_M g (Z_N - Z_j) - \rho_N g (Z_N - Z_i) \quad (8)$$

L'effet du tirage thermique est calculé par :

$$P_{es} = \rho_M g (Z_N - Z_j) - \rho_N g (Z_N - Z_i) \quad (9)$$

Dans le cas où la zone M est une zone extérieure, le terme  $\rho_M V_i^2 / 2$  corrigé par un coefficient de pression représente l'effet de la vitesse du vent.

Pour utiliser la même formulation pour différentes configurations (sans ou avec système de ventilation mécanique), l'effet du système de ventilation mécanique est compris dans le terme de pression statique.

### 3.- Couplage du bâtiment avec son système de ventilation :

L'ensemble des composants aérauliques (fissures, trous, ouvertures, gaines rectilignes, singularités, ventilateurs, bouches autoréglables, etc) est caractérisé par des lois simples de type débit-pression. Ces composants créent des liens entre les zones du bâtiment et les éléments de jonctions (Té) des réseaux aérauliques. On construit ainsi un réseau représentant les transferts aérauliques du bâtiment et son réseau de ventilation ou de conditionnement d'air. L'écriture de la conservation de la masse en chaque noeud du réseau conduit à la résolution numérique d'un système d'équations non linéaires.

### 4.- Etude de cas :

Le cas traité représente un bâtiment individuel équipé de son système de ventilation. Les voies aérauliques qui relient les différentes zones du bâtiment entre elles et à leur environnement extérieur sont de deux types :

- les liens aérauliques concernant l'enveloppe du bâtiment, tels que les portes, les fenêtres, les parois intérieures et extérieures.
- les liens aérauliques concernant le système de ventilation, tels que les gaines rectilignes et les singularités, le ventilateur, les quatre entrées d'air autoréglables placées

dans le séjour sur les deux façades sud et est. Le bâtiment et son système de ventilation ainsi que les courbes caractéristiques du ventilateur et des bouches autoréglables identiques sont représentés sur la figure 4.

Dans la suite nous allons montrer l'influence des différents paramètres et étudier l'interaction entre le bâtiment et les différents systèmes aérauliques.

Les calculs sont effectués à l'aide du modèle aéraulique multizone COMIS. Les coefficients de pression due au vent sont donnés par le tableau 2.

façade Sud	façades Ouest et Est	façade Nord	toit en pente Sud	toit en pente Nord	sortie du réseau extraction
+ 0.25	- 0.70	- 0.50	- 0.55	- 0.60	- 0.75

#### 4.1.- L'influence de la vitesse du vent :

Deux cas de températures extérieures sont étudiés 0°C et 20°C (figure 5) pour chaque zone. Le tirage thermique agit seul pour un vent nul naturellement. Pour des vitesses du vent non nulles, l'effet du vent s'ajoute à celui du tirage thermique d'une manière non linéaire.

#### 4.2.- L'influence combinées de la vitesse du vent, du tirage thermique et de l'extraction mécanique :

Pour les différentes températures extérieures 0°C et 20°C, le taux de renouvellement d'air est pratiquement constant pour les pièces de services équipées d'un système d'extraction mécanique. Le fonctionnement du ventilateur augmente considérablement le taux horaire de renouvellement d'air dans le séjour (figure 6).

#### 4.3.- Le seuil de protection :

Suivant la vitesse du vent, la ventilation du bâtiment fonctionne selon les trois étapes suivantes :

Par vitesse du vent nulle, l'air entre normalement par les deux façades (au vent et sous le vent). Le renouvellement d'air est égal au débit "spécifique" de ventilation, c'est-à-dire au débit commandé par le ventilateur.

Par vent faible, l'air continue à entrer par les deux façades mais avec un débit accru pour la façade au vent et un débit réduit pour la façade sous le vent. Le renouvellement d'air global n'est pas modifié.

A partir d'une certaine vitesse (6 m/s dans notre cas), appelée seuil de protection, l'air sort par la façade sous le vent. Le renouvellement d'air global est alors plus fort que précédemment. Au débit spécifique (le débit extrait par le ventilateur) s'ajoute un débit "supplémentaire" (le débit sortant par la façade sous le vent), fonction de la perméabilité des façades et de la vitesse du vent (cf figure 7).

La vitesse du vent influence les écarts de pression intérieure-extérieure de manière importante (cf figure 8).

#### 5.- Conclusion :

Cette étude a mis en évidence l'interaction fortes entre les trois moteurs des transferts aéraulique qui sont le tirage thermique, la vitesse du vent et l'effet des systèmes de ventilation mécanique. Cependant ces résultats demandent une validation expérimentale sur des cellules à environnement climatique réel ou simulé.

Le code COMIS dans sa version actuelle peut servir de noyau à un outil de conception d'un bâtiment multizone équipé de son système de ventilation et de diagnostiquer les installations de ventilation dans le cas de disfonctionnement par exemple. Pour cela un travail comportant sur le développement d'une interface assurant le pré et le post traitement des données et des résultats est indispensable pour une diffusion et une utilisation de ce type de code en bureau d'étude.

Ceci n'est qu'une première étape pour l'étude et la caractérisation d'un bâtiment du point de vue qualité de l'air dans le but d'une véritable gestion de l'air par l'intégration d'un modèle de pollution et l'introduction de nouveaux éléments sensibles à la pollution tels que les filtres à air et leur comportement dans le temps.

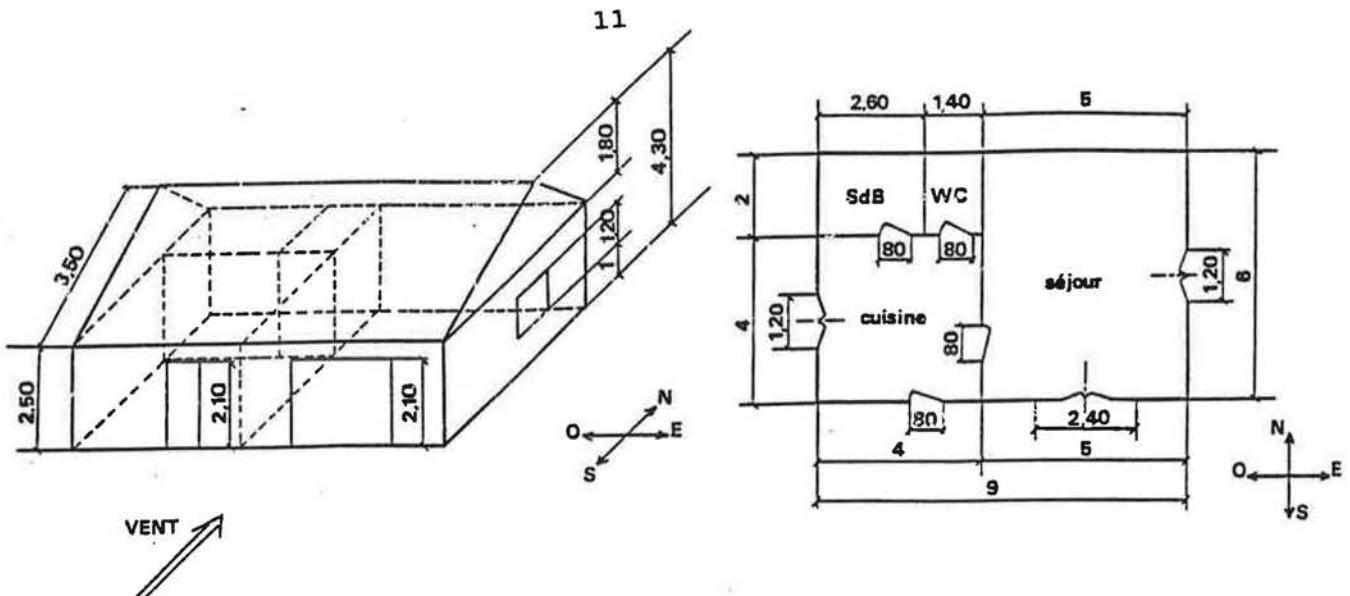


Figure 4.1 : le bâtiment étudié et ses principales dimensions

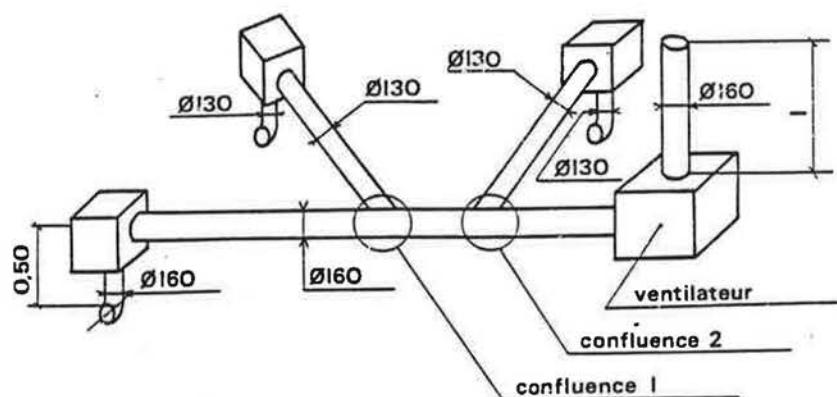


Figure 4.2 : le système de ventilation étudié et ses principales dimensions

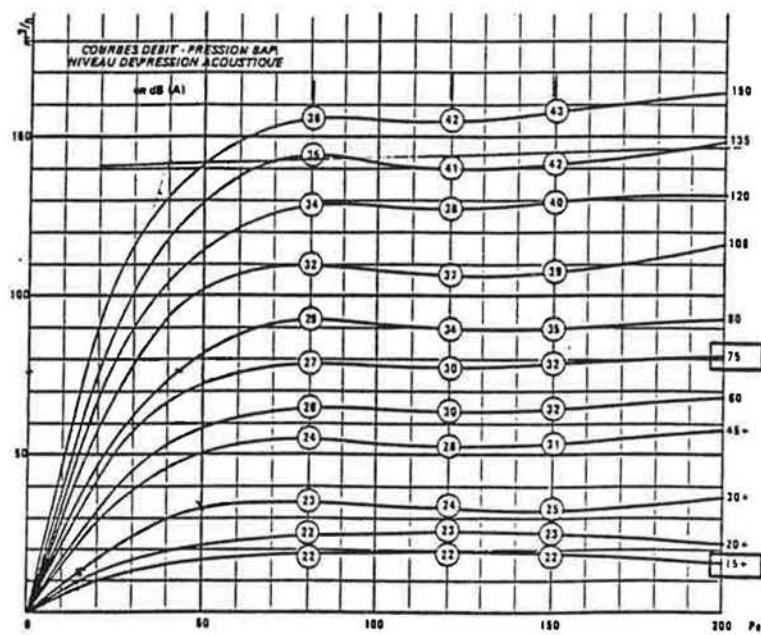


Figure 4.3.1 : la courbe caractéristique des bouches d'extraction

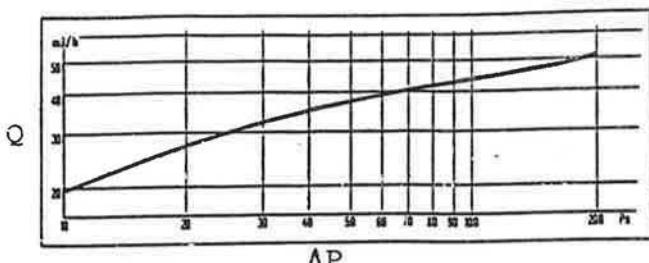


Figure 4.3.2 : la courbe caractéristique de l'entrée d'air autoréglable

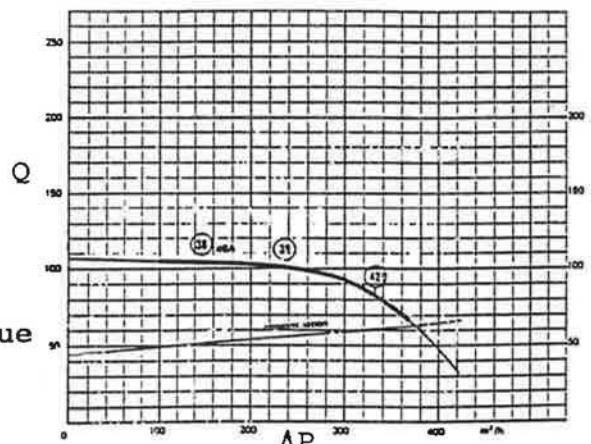


Figure 4.3.3 : la courbe caractéristique du ventilateur

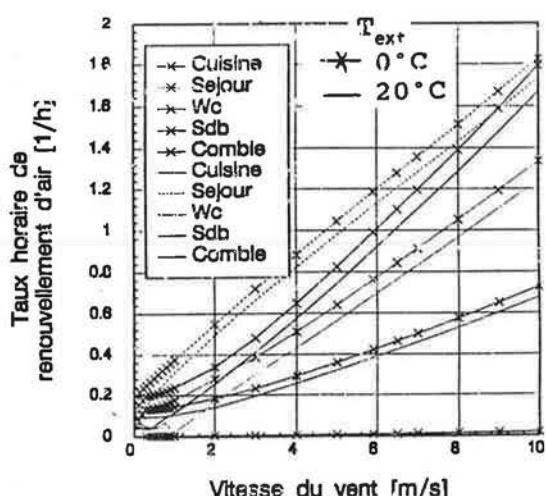


Figure 5 : effet de la vitesse du vent sur le taux de renouvellement d'air

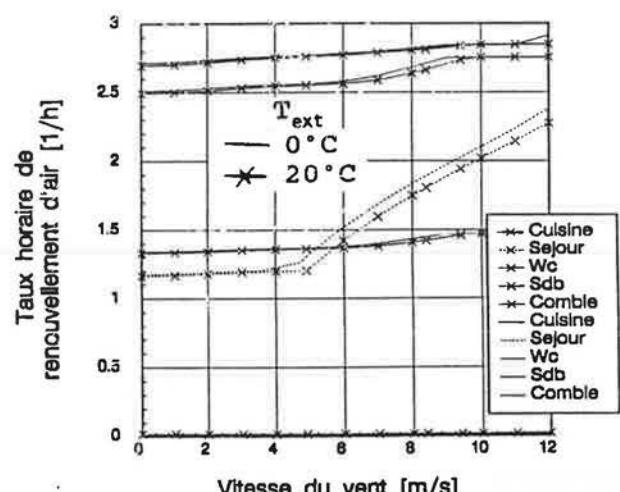


Figure 6 : effets combinés des différents moteurs de ventilation

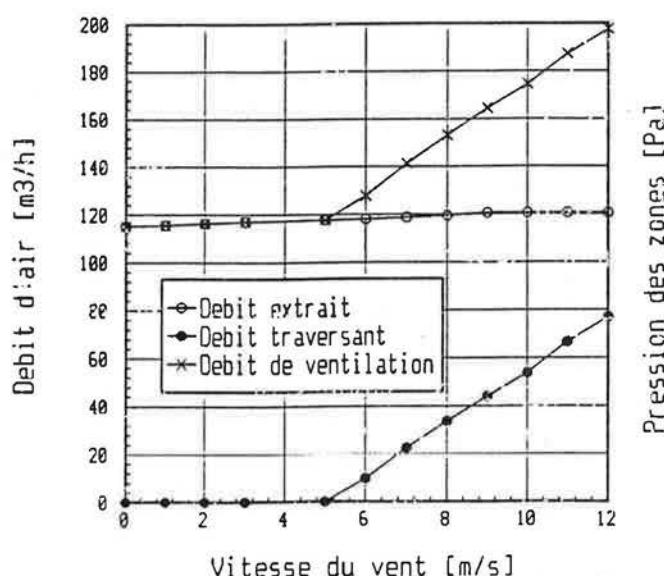


Figure 7 : effet de la vitesse du vent sur les différents débits d'air

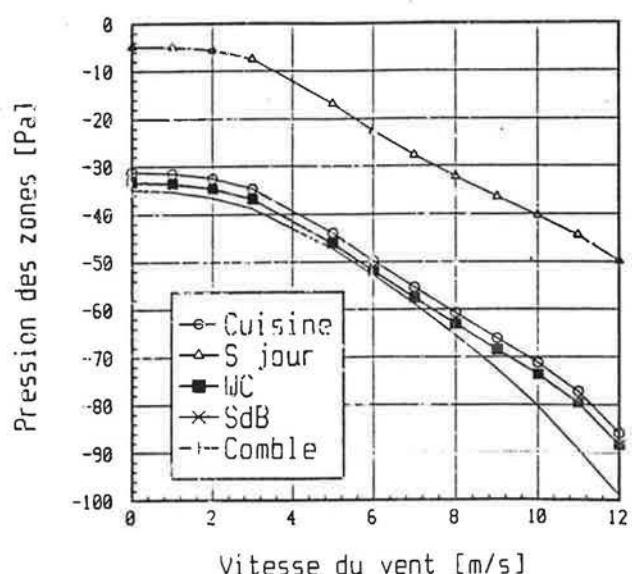


Figure 8 : la distribution des pressions intérieures

**Bibliographie :**

- [1] **B. MALO, P. VALTON**, "Etudes des modèles de ventilation et simulation du renouvellement d'air dans les locaux". Rapport final, convention A.F.M.E /Co.S.T.I.C, juin 1987
- [2] **M. W. LIDDAMENT - C. ALLEN** " The validation and comparaison of mathematical modeis of air infiltration. A.I.C.- TN11- September 1983.
- [3] **H. FEUSTEL et alii**, "Air Flow Models for Multizone Structures, an Updated Review ", Energy and Building 1991.
- [4] Benoît MAJO " Etude et analyse des modèles de ventilation ", 1987
- [5] Patrick VALTON " La ventilation ", 1981.
- [6] **F. ALLARD et alii**, "Technical Note AIVC 29. Fundamentals of the multizone. Air Flow Model-COMIS", May 1990
- [7] G.N. WALTON. 1989. "A computer algorithm for predicting infiltration and interroom airflows". ASHRAE Transactions, Vol.90, Part 1.
- [8] **A.C. MEGRI, G. KRAUSS, F. ALLARD**, "Modélisation de réseaux de distribution d'air couplés à des bâtiments multizones", GEVRA, Lyon les 21 et 22 Mars 1991
- [9] **A.C. MEGRI, F. ALLARD, G. KRAUSS** " Coupling Ventilation Network and HVAC systems to multizone infiltration models", Proceedings of the Ninth International PLEA Conference, Seville, Spain, September 24-27 1991
- [10] W.E. Murphy, Ph.D., P.E, "user assisted duct design and fan sizing for HVAC classes", ASHRAE 1989
- [11] **A. GHADILE** " Comportement aéraulique des enveloppes de bâtiment : Détermination numérique des pressions en façade. Modélisation de la perméabilité à l'air ", Doctorat présentée devant INSA de Lyon, 1990.
- [12] **A.C. MEGRI, G. KRAUSS, F. ALLARD** " Détermination expérimentale des perméabilités interzones et vis à vis de l'extérieur dans un bâtiment multizone", 5 journées Internationales de THERMIQUE, Monastir, 22-26 Avril 1991
- [13] **F. AMARA, P. DEPECKER, G. GUARRACINO, A.C. MEGRI** " Expérimentation de laboratoire pour l'étude et la mesure des transferts aérauliques dans le bâtiment" , congrès AIVC ( Air Infiltration and Ventilation Center) - GEVRA ( Groupement sur l'Etude de la ventilation et le Renouvellement d'Air) , Lyon, France, 21-22 Mars 1991.
- [14] R.J. Tsal, H.F. Behls, R.Mangel " T-Method Duct Design, Part III : Simulation " ASHRAE, 1989
- [15] Pierre JARDINIER " Appareillage de ventilation pour le bâtiment. Séminaire spécialisé 19 et 20 Septembre 1989.
- [16] Michèle BARTHEZ " Modulation de la ventilation en fonction de la teneur en CO<sub>2</sub>", rapport intermédiaire 1985.
- [17] M.K. OWEN, P.A. LAWLESS, D.S. ENSOR, I.E. SPARKS " Indoor air quality simulation : IAQPC "
- [18] M. BLONDEAU, P. GARIN, F. RENARD "Modélisation de la ventilation en fonction de la teneur en CO<sub>2</sub>" , rapport final rendant compte des travaux financés avec l'aide de l'AFME, 1986.
- [19] **F. ALLARD, M. HERRLIN**. 1989 " Wind- Induced Ventilation", ASHRAE Transactions, Vol.95, Part 2.