#4655

SOCIETE FRANCAISE DES THERMICIENS

JOURNEE D'ETUDE DU 26 NOVEMBRE 1987

SUR

L'ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA VENTILATION

TRANSFERT AERAULIQUE DANS LES BATIMENTS : PRESENTATION DE DEUX NIVEAUX D'APPROCHE

D. CACCAVELLI, J.J. ROUX, F. ALLARD

Laboratoire Equipement de l'Habitat
Centre de Thermique - Bât 307
INSA 69621 VILLEURBANNE CEDEX

I.- INTRODUCTION

De nos jours, en partie du fait d'une meilleure isolation des bâtiments, le poste occupé par la ventilation au niveau de la consommation énergétique ne cesse de voir son importance croître. Cependant, il n'y a pas que l'aspect énergétique qu'il faille retenir. En effet, la ventilation qu'elle soit d'origine naturelle (infiltration) ou mécanique a des répercussions aussi bien au niveau des conditions d'hygiène (migration de polluants) qu'au niveau des risques de dégradation de la construction (condensation locale).

Il est donc important de pouvoir modéliser les mécanismes qui régissent le phénomène de la ventilation. Mais ceci n'est envisageable que si l'on tient compte des considérations suivantes :

- La modélisation doit inclure plusieurs niveaux d'approche compatibles avec l'usage que l'on prétend en faire . Ainsi , une étude sur les mouvements de fumées dans des locaux compartimentés s'accomodera moins bien de l'absence de stratification des températures qu'une étude portant sur l'influence des infiltrations d'air dans la consommation d'un bâtiment.

-Le modéle thermique et le modéle aéraulique qui lui est associé doivent être en totale adéquation , et ce aussi bien dans le choix des hypothéses qu'au niveau des méthodes de résolution .

C'est dans ce contexte qu'ont été développés , au sein du Laboratoire Equipement de l'Habitat , deux modéles qui ont en commun de contribuer à une meilleure connaissance des phénoménes liés à la ventilation , mais dont les niveaux d'approche différents. XX

sont

* Le premier modéle , mis au point par A. ROLDAN [1,2] à une vocation d'outil de recherche appliquée . Son élaboration s'est donc voulue la plus exhaustive possible . Il constitue la partie aéraulique d'un code génèral de simulation du comportement thermique des bâtiments en régime variable intitulé "TONY" , lui même développé conformément à la structure informatique du logiciel américain TRNSYS [3].

* Le second modéle a une toute autre finalité puisqu'il s'inscit dans une optique d'outil de conception . De part son formalisme et son support informatique (micro-ordinateur) , il entre dans la catégorie des modéles dits "simplifiés" . A ce titre il a pu être intégré à un logiciel de calcul de charge thermique intitulé "ICARE" [4,5] disposant d'un niveau d'hypothéses similaire .

Nous nous proposons, dans un premier temps, de détailler ces deux niveaux d'approche puis, après les avoir confrontés à l'expérimentation, nous étudierons l'influence de leurs hypothéses respectives sur le comportement thermique d'un bâtiment.

II.- PRESENTATION DU PHENOMENE

Les infiltrations d'air dans un bâtiment sont occasionnées par la différence de pression qui existe de part et d'autre des éléments de l'enveloppe.

Les moteurs, à l'origine de cette différence de pression sont :

- le vent ,qui agissant par sa vitesse et sa direction, crée une surpression ou une dépression sur une façade ;

- le tirage thermique provoqué par la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur.

Sous l'effet de cette différence de pression, il va s'établir un débit à travers les ouvertures de l'enveloppe. Ce débit peut être entrant ou sortant ,et il est involontaire puisque dépendant des conditions climatiques. Le renouvellement d'air dû à l'aération volontaire s'ajoute en valeur algébrique à ce débit traversant.

Nous allons étudier maintenant l'action de ce deux "forces" motrices.

II.1.- Effet du vent

Le vent développe sur tous les obstacles un champ de pression fluctuant dans le temps.

La pression instantanée, en un point donné, peut s'exprimer par la relation :

$$P(z,t) = \overline{P_v}(z) + P'_v(z,t) \qquad (1)$$

où $\overline{P_v}(z)$ est la pression moyenne sur une durée ΔT et $P'_v(z,t)$ la fluctuation instantanée. Cependant dans le contexte du calcul des infiltrations d'air dans un bâtiment ,seule la notion de pression moyenne à l'échelle de l'heure est à retenir.

La pression aérodynamique moyenne $\overline{P_v}$ s'exerçant sur un bâtiment est liée à la vitesse moyenne du vent $\overline{V}$, en un point quelconque, par la relation :

$$\overline{P_v}(z) = \frac{1}{2}\rho.\overline{C_p}.\overline{V}(z)^2 \qquad (2)$$

où :

$\overline{P_v}$ = Pression aérodynamique moyenne, Pa
ρ = Masse volumique de l'air, kg/m^3
$\overline{V}$ = Vitesse moyenne du vent, m/s
$\overline{C_p}$ = Coefficient de pression moyen
z = Cote du point, m

La vitesse moyenne du vent sur le site de calcul est reliée à la vitesse du vent mesurée à la station météorologique la plus proche, par une relation du type logarithmique [6].

$$\overline{V}(z) = k \, \mathrm{Log}_e \left(\frac{z}{z_o}\right) \overline{V}_{météo} \qquad (3)$$

où :

z = Côte du point, m
$\overline{V}_{météo}$ = Vitesse de vent mesurée par les stations météorologiques à une hauteur de 10 m, m/s.
k, z_o = Constantes dépendant de la rugosité du sol.
Elles ont été estimées pour différentes classes de sites (Tableau (1)).

	Classe de rugosité				
	Effet plan d'eau	Rase campagne (référence météo)	Zone rurale bocage	Zone urbanisée ou forestière	Centre de grande ville
z_o (m)	0.005	0.07	0.3	1	2.5
k	0.166	0.202	0.234	0.266	0.292

Tableau 1 : Paramétres caractéristiques du site

Le coefficient de pression C_p traduit le fait que le vent induit sur les différents obstacles qu'il rencontre ,des écoulements de contournement. Ce coefficient dépend de la forme du bâtiment, du type de rugosité du sol ,ainsi que de la nature de l'environnement du bâti.

II.2.- Effet du tirage thermique

Le tirage thermique provient de la différence de masse volumique existant entre l'air extérieur et l'air intérieur d'un bâtiment. Cette différence de masse volumique est liée à la différence de température entre les deux ambiances et engendre un champ de pression différentielle sur les parois de l'enveloppe. Elle provoque de la sorte des infiltrations et des exfiltrations d'air à travers le bâtiment (figure 1).

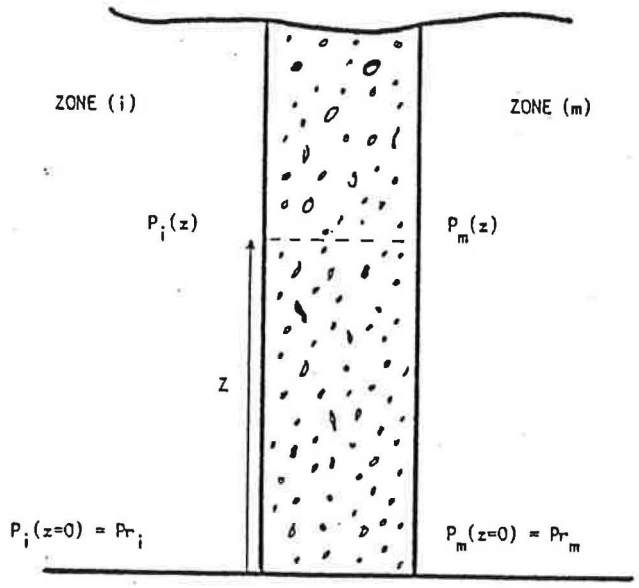


Figure 1 : Définition des différentes pressions.

Le différentiel de pression statique s'établissant à l'altitude z, entre les zones (i) et (m), s'écrit alors :

$$P_i(z) - P_m(z) = Pr_i - Pr_m - (\rho_i - \rho_m) \cdot g \cdot z \qquad (4)$$

L'axe qui passe par la hauteur pour laquelle l'écart de pression s'annule, s'appelle l'axe neutre. La position de cet axe est très importante car c'est elle qui détermine l'allure du champ de pression statique (figure 2) et par voie de conséquence la répartition des débits d'air dans le bâtiment.

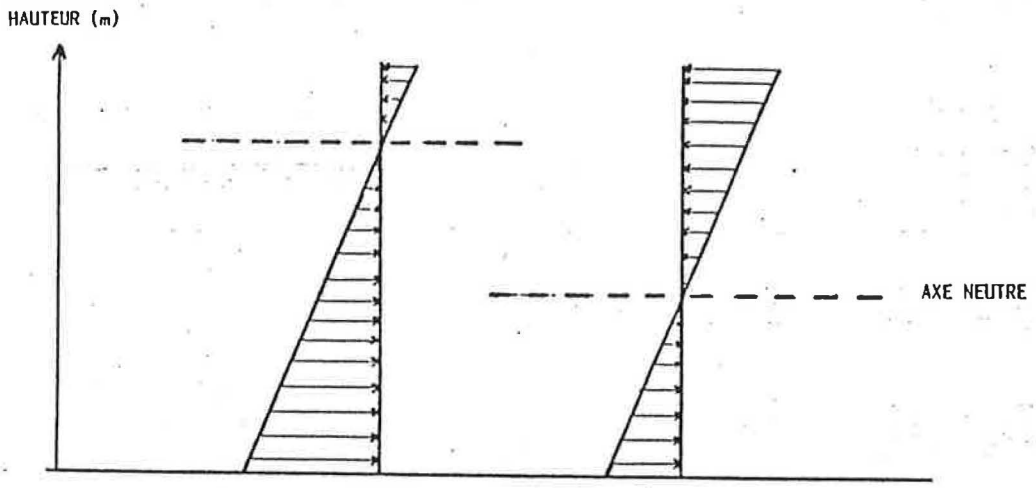


Figure 2 : Champ de pression différentielle statique s'exerçant sur une paroi en fonction de la hauteur et pour 2 positions de l'axe neutre.

II.3.- Action simultanée des deux forces motrices

Le vent et le tirage thermique agissent toujours simultanément pour provoquer des infiltrations d'air parasites dans un bâtiment. L'action combinée de ces deux phénomènes est complexe car elle dépend d'une part de la géométrie du bâtiment et d'autre part des conditions climatiques du site.

C'est l'étude de cette action qui définie les principales méthodes de calcul des infiltrations d'air.

Compte tenu des équations (2) et (4), la pression relative moyenne calculée à une hauteur z entre les ambiances (i) et (m), sous l'action simultanée du vent et du tirage thermique, s'écrit :

$$\Delta\overline{P} = P_i - P_m = Pr_i - Pr_m - (\rho_i - \rho_m).g.z + \frac{1}{2}\rho_i.\overline{C}_p.\overline{V}^2(z) \quad (5)$$

avec :

$$\begin{cases} Pr_i = 0 \text{ si l'ambiance (i) est extérieure } (P_{atm} = 0 \text{ Pa}) \\ C_p = 0 \text{ si l'ambiance (i) est intérieure} \end{cases}$$

II.4.- Equation caractéristique du débit

Cette équation, appelée également loi d'écoulement, caractérise la relation entre le débit volumique d'air traversant une ouverture et la différence de pression appliquée de part et d'autre de cette ouverture.

Cette équation, quelque soit le type d'ouverture, peut s'écrire :

$$Q_j = C_j.(\Delta \overline{P}_j)^{\beta_j} \qquad (6)$$

où :

Q_j = Débit volumique d'air traversant l'ouverture j, m^3/h.
C_j = Coefficient d'écoulement de l'ouverture j, défini comme étant le débit volumique d'air traversant l'ouverture sous un écart de pression de 1 Pa, m^3/h à 1 Pa.
$\Delta \overline{P}_j$ = Différence de pression moyenne s'exerçant de part et d'autre de l'ouverture j et induite par les effets combinés du vent et du tirage thermique, Pa.
Son expression est donnée par l'équation (5).
β_j = Exposant caractéristique de l'écoulement.

La valeur de l'exposant β_j dépend de la nature de l'écoulement et par voie de conséquence du type d'ouverture. Cet écoulement est laminaire quand les forces de viscosité sont dominantes.C'est le cas lorsque les zones d'infiltration sont rugueuses et étroites. Par contre lorsque les forces d'inertie sont prépondérantes, ce qui est le cas pour des ouvertures larges, l'écoulement devient turbulent. Cela signifie que pour de faibles écarts de pression βj tend vers 1 alors que pour des écarts de pression plus importants βj tend vers 0.5.

De nombreux auteurs [7 et 8] ont suggéré une valeur intermédiaire β_j = 0.67, afin de caractériser les écarts de pression rencontrés communément dans les logements.

Nous avons adapté la loi générale d'écoulement définie par l'équation (6) à deux types d'ouvertures caractéristiques de l'habitat.

* Pour des ouvertures fixes (par exemple des bouches d'entrée d'air) l'écoulement étant turbulent nous pouvons écrire :

$$Q_j = C_d.A_j.\sqrt{\frac{2.\Delta P_j}{\rho}} \qquad (7)$$

où :
C_d = Coefficient de décharge
A_j = Surface de l'ouverture, m^2
ρ = Masse volumique de l'air, kg/m^3
$\Delta \overline{P}_j$ = Différence de pression moyenne calculée au centre de l'ouverture, Pa.

Le coefficient de décharge C_d est fonction du nombre de Reynolds et du rapport de la surface de l'ouverture sur la surface totale. Pour le type d'ouverture considérée (orifices à bords tranchants) C_d est égal à 0.6.

* Pour toutes les ouvertures involontaires (fissures, fentes et de manière générale tous les défauts d'étanchéité), la loi d'écoulement s'écrit :

$$Q_j = K_j . L_j . (\Delta \overline{P}_j)^{0.67} \qquad (8)$$

où :

K_j = Coefficient de perméabilité de l'ouverture, $m^3/h.m$ sous 1 Pa.
L_j = Longueur de la fissure, m.
$\Delta \overline{P}_j$ = Différence de pression moyenne calculée à travers la fissure, Pa.

Cette équation s'applique à tous les composants présentant des défauts d'étanchéité. Mais, si la localisation de ces défauts (liaisons ouvrants/dormants, tableau de fusibles et du disjoncteur, trappes d'accès aux gaines techniques,...) est difficile à obtenir pour un bâtiment existant, elle devient virtuellement impossible dans le cadre d'un projet sur plan. Aussi avons nous supposé que les fuites se répartissaient de façon uniforme sur chacune des faces exposées au vent du bâtiment. Avec cette hypothèse ,un seul coefficient de perméabilité à l'air caractérise l'ensemble des défauts d'étanchéité de chaque façade, ce qui facilite la saisie des données et la résolution de l'équation (8) .

Pour accéder à ce coefficient deux procédures peuvent être utilisées :

- La première consiste à partir de la perméabilité à l'air totale du bâtiment (mesurée à l'aide d'une technique consistant à mettre un local en pression ou en dépression [9]), puis à répartir cette perméabilité au prorata des surfaces des façades.

- La seconde consiste à recenser les coefficients de perméabilité de chaque ouverture involontaire puis à effectuer un cumul.La perméabilité à l'air totale du bâtiment étant rarement accessible, on aura souvent recours à la seconde procédure pour les études en phase de conception ou de réhabilitation.

III.- MODELE DETAILLE

L'analyse détaillée du comportement thermique des bâtiments nécéssite la prise en compte éffective de l'aspect multizone du bâtiment . Cette approche ne peut se justifier que si le probléme du couplage entre zones est réellement abordé . Or, les échanges aérauliques constituant une part importante de ce couplage , il était donc nécéssaire de disposer d'une méthode fine adaptée à l'ètude de ces échanges .

C'est dans ce contexte que A. ROLDAN [1] , s'inspirant des travaux de G.N. WALTON [10] , a développé un modéle detaillé de calcul des infiltrations d'air qu'il a implanté sur un HARRIS 800 en langage FORTRAN 77 .

Ce modéle de connaissance a permis d'analyser l'influence d'un certain nombre de paramétres et notamment celle de la description multizone d'un habitat . L'étude réalisée montre clairement que , si d'une part une description multizone est nécéssaire voire indispensable (si l'on prétend suivre la dynamique du comportement thermique) , d'autre part la finesse des résultats éscomptée ne dépend pas forcément d'un découpage minutieux (dans le cas traité un découpage en deux zones était suffisant) .

Cette remarque a pour nous une conséquance pratique puisqu'elle nous permet de justifier l'implantation de ce modéle sur un micro-ordinateur de capacité mémoire plus faible .

Dans la suite du texte , l'ensemble des remarques faisant état du modéle dit "détaillé" se référeront à la version implantée sur micro-ordinateur (HEWLETT PACKARD serie 200) .

Le modèle détaillé calcule la répartition des pressions le long des façades du bâtiment ce qui permet alors l'évaluation des mouvements d'air entre l'intérieur et l'extérieur et entre les différentes zones du bâtiment .

Son domaine d'application n'est restreint que par les hypothèses suivantes :

- tous les phénomènes de turbulence sont négligés.

- la température de chaque zone étant supposée uniforme, il ne peut y avoir d'écoulement vertical (effet de cheminée) au sein d'une zone.

- La loi d'écoulement adoptée étant celle définie par l'équation (6) , il ne peut être question de simuler l'ouverture ou la fermeture des portes et fenêtres donnant sur l'extérieur .Il faudrait utiliser pour cela un modèle en vitesse [11] ,et non pas en pression.

Compte tenu de ce qui précède, le calcul des infiltrations d'air dans un bâtiment s'obtient par le processus suivant :

- Chaque façade, de coefficient de perméabilité à l'air K_f, est découpée en N tranches d'aires égales.

- A chaque tranche est affectée une perméabilité équivalente $k = K_f/N$.

- On calcule, suivant l'équation (5), la différence de pression s'exerçant de part et d'autre de chaque tranche, en son point median.

- Enfin, en appliquant la loi d'écoulement appropriée, on obtient le débit traversant chaque tranche.

Soit $Q_{j,k}'$ le débit massique d'air traversant la k'ème tranche de la façade j appartenant à la zone (i).

Soit Q_l' le débit massique d'air traversant la l'ème ouverture fixe (bouche d'entrée d'air par exemple) de la zone (i).

Soit Q_{VMC} (i) le débit massique d'extraction (ventilation mécanique) de la zone (i).

L'équation de conservation de la masse s'écrit alors pour chaque zone :

$$\sum_{j=1}^{Ntfac(i)} \sum_{k=1}^{N(j)} Q_{j,k}' + \sum_{l=1}^{Ntouv(i)} Q_l' - Q_{VMC}(i) = 0 \qquad (9)$$

où :

Ntfac(i) = Nombre total de façades pour la zone (i)
Ntouv(i) = Nombre total d'ouvertures fixes pour la zone (i)

Le calcul des mouvements d'air dans un bâtiment revient à résoudre, à chaque pas de temps, un système d'équations non-linéaires dont les inconnues sont les pressions de référence de chaque zone. Cette résolution s'effectue en utilisant la méthode de Newton généralisée à des systèmes d'équations non-linéaires [1,12], ce qui nécessite l'emploi d'un schéma itératif dont la rapidité de convergence dépend de la solution initiale. Or cette solution initiale est à chaque pas de temps (1 heure dans notre cas) fortement perturbée par les fluctuations temporelles des variables climatiques (température extérieure, vitesse et direction de vent) ainsi que par les températures d'air de chaque zone. La convergence est donc relativement longue, et même si elle peut être accélérée par des techniques de sur ou de sous-relaxation, elle induit des temps de calcul qui, sur un gros serveur, ne sont pas conséquents mais qui le deviennent lorsque le support matériel est la micro-informatique.

IV.- MODELE SIMPLIFIE

Lorsque la valeur intrinsèque des différents débits résultant des échanges d'air dans les bâtiments ne revêt pas un caractère d'importance primordiale, c'est à dire lorsque seules des estimations, voire des tendances, sont à dégager, le modèle détaillé peut apparaître à certains égards pénalisant (temps de résolution prohibitif). Un modèle plus simplifié trouve alors sa raison d'être.

Ce constat nous a conduit à développer une approche simplifiée du calcul des infiltrations d'air dans les bâtiments.

Cette approche ne peut toutefois s'envisager que dans le sens d'une restriction du domaine de validité du modèle puisque certaines libertés sont prises vis à vis du phénomène physique lui-même. Les simplifications se sont orientées selon deux directions :

- un découplage des actions induites par les effets respectifs du vent et du tirage thermique.

- un découplage du module aéraulique et du module de résolution thermique du bâtiment.

Compte tenu de ces simplifications, notre démarche a consisté à rechercher un compromis satisfaisant entre un gain de temps appréciable et des résultats cohérents .

Le modèle dit "simplifié" s'articule autour des deux principes suivants :

- Une phase de pré-calcul des débits d'air entrant dans chaque zone sous les actions successives du vent puis du tirage thermique . Cette phase conduit au stockage des différents débits dans des matrices représentatives des deux forces "motrices".

- Une phase de calcul où sont combinés les débits d'air provenant des effets du vent et du tirage thermique.

Nous allons détailler chacune de ces deux étapes .

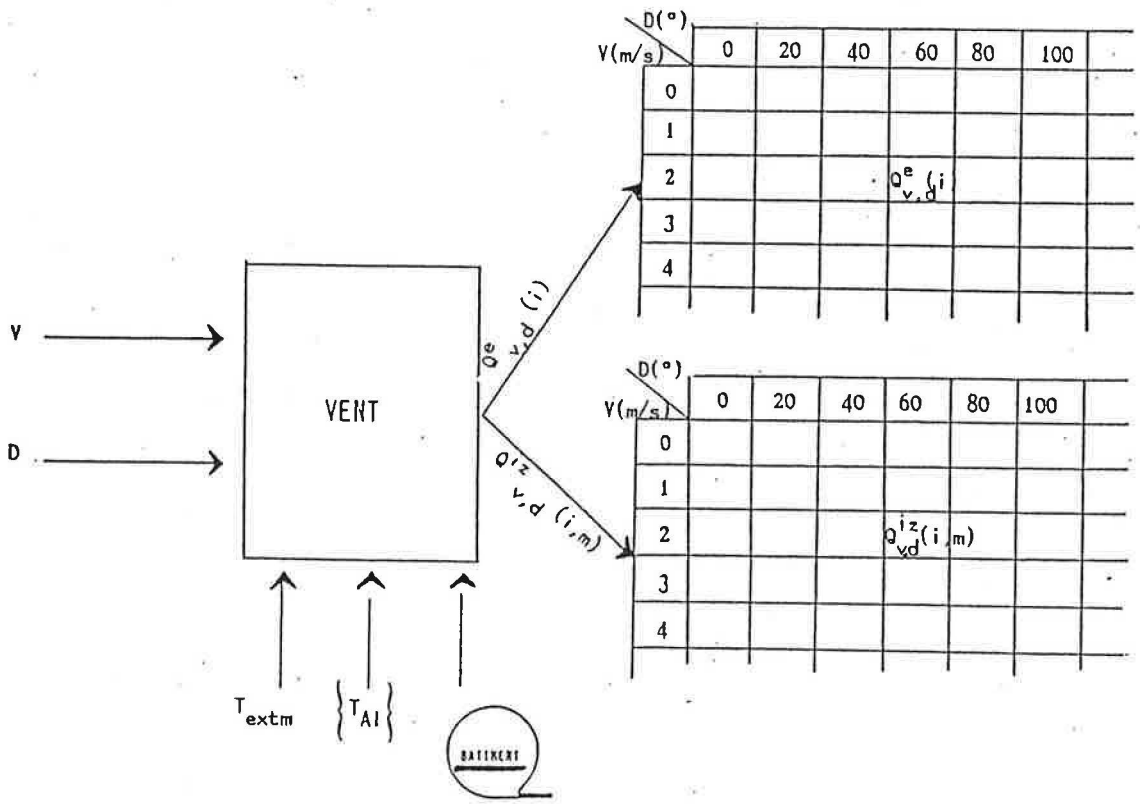
IV.1.- Phase de pré-calcul

Cette phase est entièrement autonome: elle ne dépend que des caractéristiques du bâtiment et des conditions climatiques externes. Sa durée est surtout fonction du nombre de zones. Une fois les pré-calculs effectués, les résultats sont stockés dans des fichiers,prêts à être utilisés par le logiciel ICARE .

IV.1.1.- Calcul des débits d'air induits par les effets du vent

Les débits d'air pénétrant dans chaque zone du bâtiment sont pré-calculés pour un couple de sollicitations vitesse-direction du vent donné. Les autres sollicitations (températures extérieures et intérieures) sont supposées constantes sur la période étudiée.

Nous utiliserons une représentation symbolique, issue des travaux du groupe A.L.M.E.T.H. [13] (Atelier Logiciel de Modélisation Energétique pour le Tertiaire et l'Habitat) afin de visualiser le processus.



Nomenclature

Entrées

- V : Vitesse du vent, m/s
- D : Direction du vent/Sud, °

Sorties

- $Q^e_{v,D}(i)$: Débit massique d'air passant de l'extérieur vers la zone (i), kg/h.
- $Q'^z_{v,D}(i,m)$: Débit massique d'air circulant de la zone (m) vers la zone (i), kg/h.

Paramètres

- i,m : Indices relatifs aux zones.
- T_{extm} : Moyenne des températures extérieures sur la période étudiée, C.
- $\{T_{AI}\}$: Vecteur associé aux températures d'air de chaque zone. Pour des locaux chauffés cette température d'air correspondra à la température de consigne. Pour des locaux non chauffés, un calcul en régime permanent sera nécessaire.

Afin de ne pas avoir des matrices de taille démesurée nous avons limité le champ d'application des deux sollicitations :

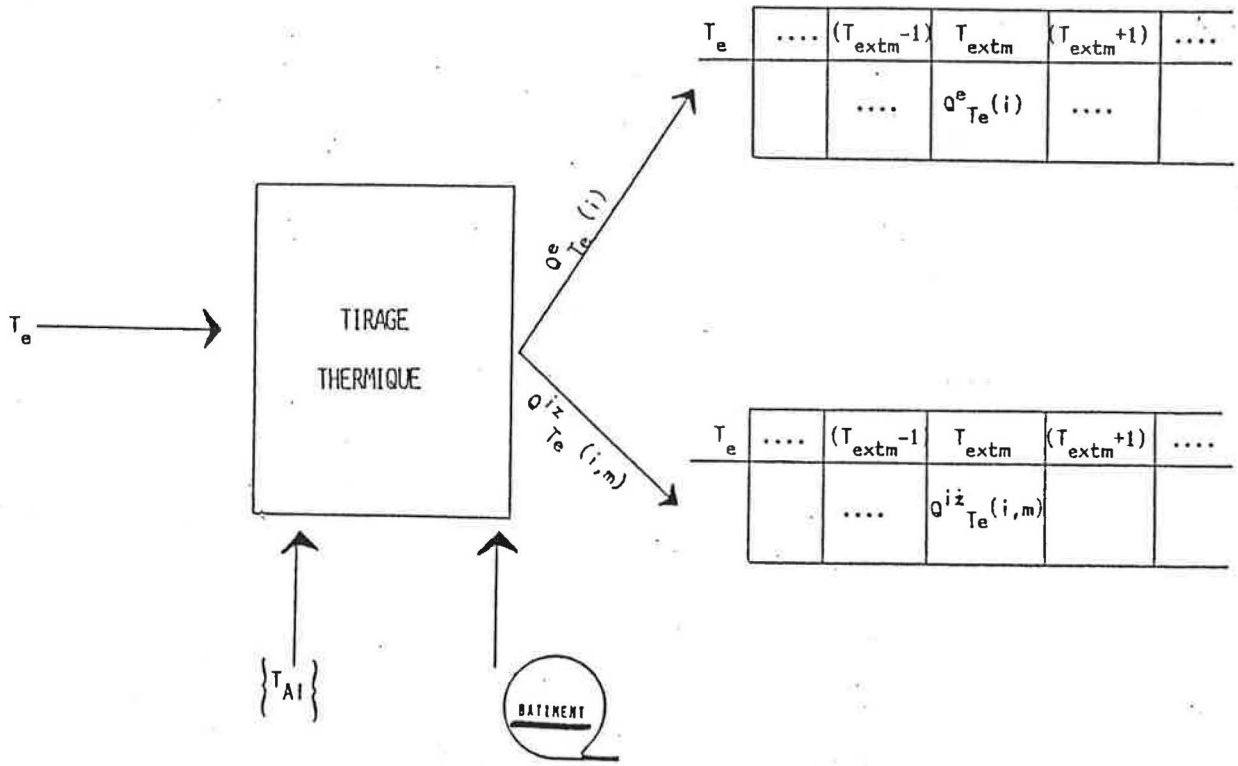
- la vitesse du vent est comprise entre 0 et 10 m/s avec un pas d'incrémentation de 1 m/s.
- la direction du vent est comprise entre 0 et 340° avec un pas d'incrémentation de 20°.

Cette limitation est en harmonie avec les données météorologiques fournies par les différentes stations.

La méthode de résolution des débits d'air induits par le vent seul est résumée dans le tableau (2).

IV.1.2.- Calcul des débits d'air induits par les effets du tirage thermique

Les débits d'air pénétrant dans chaque zone du bâtiment sont pré-calculés en fonction des seules variations de la température extérieure, les autres sollicitations (températures d'air intérieur de chaque zone) étant supposées constantes sur la période étudiée. En utilisant toujours la même représentation symbolique, nous obtenons :



Nomenclature

Entrées $\{ T_e$: Température extérieure, C

Sorties
- $Q^e_{Te}(i)$: Débit massique d'air passant de l'extérieur vers la zone (i), kg/h.
- $Q^{iz}_{Te}(i,m)$: Débit massique d'air circulant de la zone (m) vers la zone (i), kg/h.

Paramètres
- i,m : Indices relatifs aux zones.
- $\{T_{Ai}\}$: Vecteur associé aux températures d'air de chaque zone. Même définition qu'au paragraphe IV.1.1.

Les variations de la température extérieure sont obtenues à partir de la moyenne des températures extérieures sur la période étudiée : T_{extm}.

$$(T_{extm} - 7) \leq T_e \leq (T_{extm} + 7)$$

Soit au total 15 valeurs différentes pour T_e.

La méthode de résolution utilisée est résumée dans le tableau (2).

IV.2.- Phase de calcul

Le principe de la méthode simplifiée que nous venons d'exposer a consisté à découpler les effets du vent et du tirage thermique afin d'étudier leurs actions respectives séparément. Il nous faut donc maintenant chercher à combiner ces deux effets.

R. CADIERGUES [14] a montré que la combinaison des deux effets se situait toujours entre :

- celui qui correspondait au vent seul,
- celui qui correspondait à l'addition des effets du vent et du tirage thermique.

L'ASHRAE [15] propose la corrélation suivante :

$$Q^e_T(i) = Q_{max} \cdot \left(1 + 0.24 \cdot \left(\frac{Q_{max}}{Q_{min}}\right)^{3.3}\right) \qquad (10)$$

où :

$Q^e_T(i)$ = débit massique d'air, résultant des effets combinés du vent et du tirage thermique et passant de l'extérieur vers la zone (i), kg/h.

avec :

$$\begin{cases} Q_{max} = \text{MAX}\ (Q^e_{V,D}(i),\ Q^e_{Te}(i)) \\ Q_{min} = \text{MIN}\ (Q^e_{V,D}(i),\ Q^e_{Te}(i)) \end{cases}$$

Pour notre part, nous avons préféré utiliser une relation plus simple :

$$\begin{cases} Q^e_T(i) = \sqrt{(Q^e_{V,D}(i))^2 + (Q^e_{Te}(i))^2} \\ Q'^z_T(i,m) = \sqrt{(Q'^z_{V,D}(i,m))^2 + (Q'^z_{Te}(i,m))^2} \end{cases} \qquad (11)$$

	EFFET VENT		EFFET TIRAGE THERMIQUE	
	FACADE J	OUVERTURE FIXE L	FACADE J	OUVERTURE FIXE L
VITESSE DU VENT	$\overline{V} = k \, Log_e \left(\frac{z_{fac}}{z_o}\right) \overline{V}_{ref}$ z_{fac} : hauteur maximale de la façade j,(m)	$\overline{V} = k \, Log_e \left(\frac{z_{ouv}}{z_o}\right) \overline{V}_{ref}$ z_{ouv} : hauteur du centre de l'ouverture fixe l,(m)		
DIFFERENCE DE PRESSION	$P_i - P_e = Pr_i - Pr_e + \frac{1}{2} \rho_i \, \overline{Cp} \, \overline{V}^2$ $Pr_i = 0$ si l'ambiance i est extérieure $C_e = 0$ si l'ambiance i est intérieure	$P_i - P_e = Pr_i - Pr_e + \frac{1}{2} \rho_i \, \overline{Cp} \, \overline{V}^2$ idem	$P_i - P_e = Pr_i - Pr_e - (\rho_i - \rho_e).g.z_k$ z_k = hauteur du centre de la k'ème tranche de la façade j(m)	$P_i - P_e = Pr_i - Pr_e - (\rho_i - \rho_e).g.z_{ouv}$ z_{ouv} = hauteur du centre de l'ouverture fixe l,(m)
LOI D'ECOULEMENT	$Q_i' = K_f . \rho . (P_i - P_e)^{0.67}$ K_f = coefficient de perméabilité à l'air de la façade j, (m^3/h à 1 Pa)	$Q_i' = 0.806 . \sqrt{\rho} . A_i . \sqrt{(P_i - P_e)}$ A_i = Aire de l'ouverture, m^2	$Q_{j,k}' = \rho . k . (P_i - P_e)^{0.67}$ $k = K_f / N$ N : nombre de subdivision de la façade j	$Q_i' = 0.806 . \sqrt{\rho} . A_i . \sqrt{(P_i - P_e)}$
EQUATION DE CONSERVATION DE LA MASSE PAR ZONE	$\sum_{j=1}^{Ntfac(i)} Q_j' + \sum_{l=1}^{Ntouv(i)} Q_l' - Q_{vmc}(i) = 0$		$\sum_{j=1}^{Ntfac(i)} \sum_{k=1}^{N(i)} Q_{j,k}' + \sum_{l=1}^{Ntouv(i)} Q_l' = 0$	
METHODE DE RESOLUTION	Méthode de Newton généralisée à des systèmes d'équations non-linéaires		Méthode de Newton généralisée à des systèmes d'équations non-linéaires	

Tableau 2 : Méthode simplifiée de calcul des infiltrations d'air dans les bâtiment

V.- Confrontation des deux modèles avec l'experimentation

Nous avons confronté les résultats numériques obtenus par nos deux modeles à ceux issus d'une campagne de mesures effectuée au Canada dans la banlieue résidentielle d'Ottawa, sous l'ègide de la D.B.R.(Division of Building Research).

Ce programme d'ètude dèsigné sous l'appelation de MARK XI Energy Research Project [16,17 et 18] a porté sur l'instrumentation puis sur la conduite d'essais destinés à mesurer les infiltrations d'air dans quatre cellules d'habitation individuelles. Nous nous interesserons plus particulierement à la cellule dite standard dont l'architecture est présentée figure (3) .

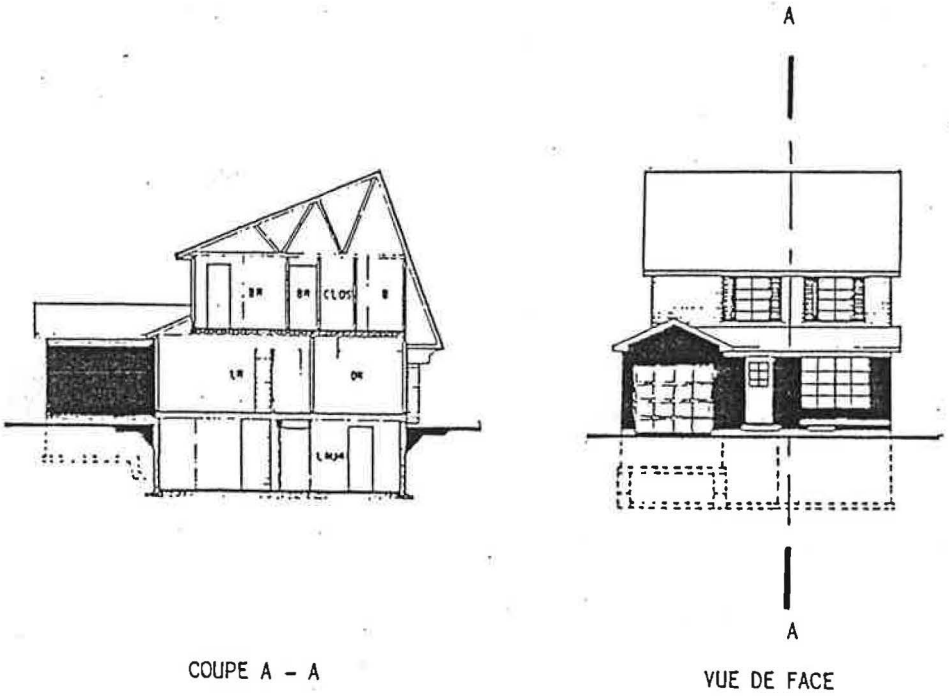


Figure 3 : Conception architecturale de la cellule standard.

Au total, 37 mesures d'infiltration d'air ont été effectuées durant l'hiver 78-79. La technique utilisée est celle du gaz traceur [19].On introduit dans le local à étudier une certaine quantité de gaz traceur dont on peut suivre la variation de la concentration dans le temps ,à l'aide d'un analyseur d'air. Cette variation est due à l'introduction d'air frais par renouvellement d'air.

La perméabilitè à l'air de l'enveloppe du bâtiment à été , quant à elle, obtenue par des tests de préssurisation. Les résultats de ces tests (figure (4)) permettent d'estimer cette perméabilitè à une valeur de Kmes=.234 $m^3/h.m^3$ à 1 Pa (pour un volume habitable de V=386 m^3) ce qui constitue,pour une habitation individuelle, une trés bonne garantie d'étanchéité.

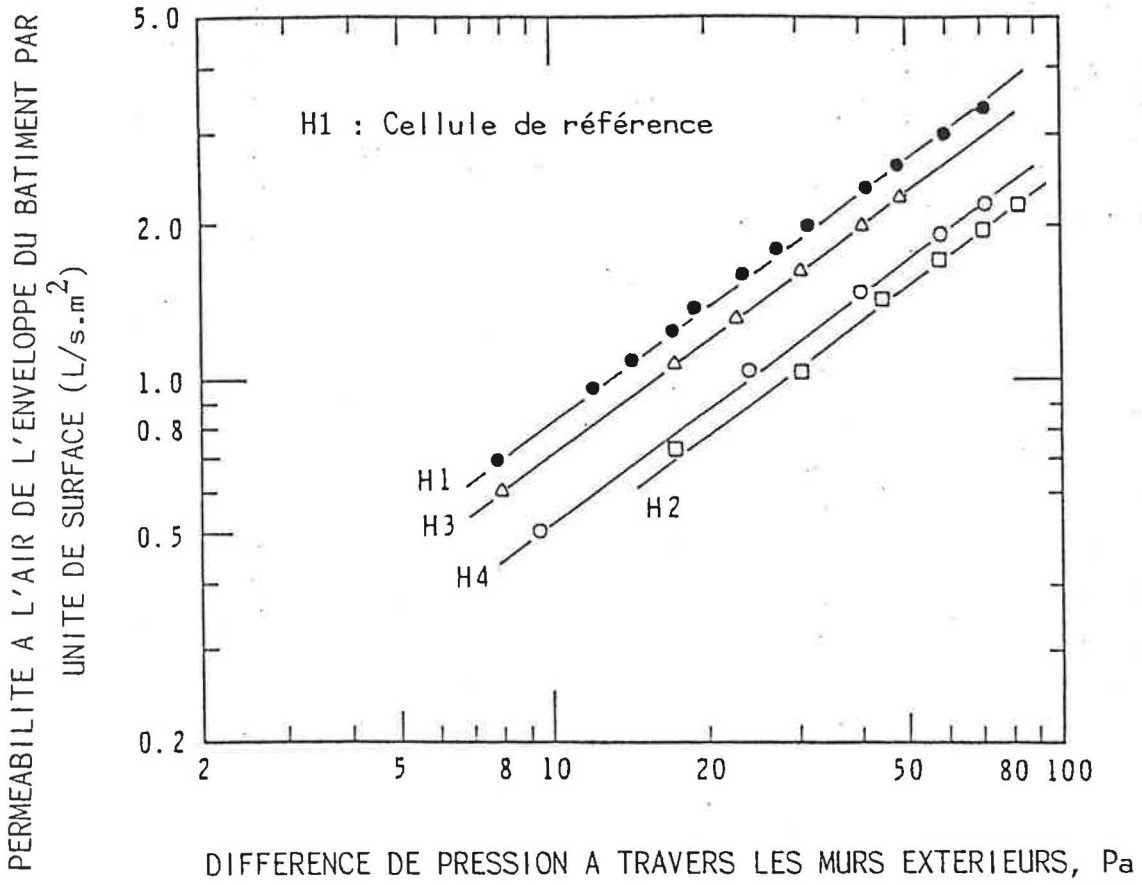


Figure 4 : Résultats des tests de préssurisation , éffectués sur les quatre cellules ,portés en coordonnées logarithmiques.

Le tableau (3) résume une partie de la campagne d'expérimentations menée. Nous y avons représenté les conditions climatiques dans lesquelles ont été faites ces mesures, ainsi que les résultats qui leurs correspondent aussi bien au niveau expérimental qu'au niveau numérique. Ces résultats sont présentés sous la forme de taux de renouvellement d'air.

NUMERO DE L'ESSAI	TEMPERATURE AIR		VITESSE VENT (m/s)	DIRECTION VENT	VALEURS MESUREES ($m^3/h.m^3$)	VALEURS CALCULEES MODELE DETAILLE ($m^3/h.m^3$)	VALEURS CALCULEES MODELE SIMPLIFIE ($m^3/h.m^3$)
	INTERIEURE (°)	EXTERIEURE (°)					
1	22.4	4	4.83	N	.219	.222	.225
2	20.4	-12.7	1.65	N	.264	.257	.258
3	20.7	-2.6	3.93	NW	.274	.231	.234
4	22	-10.6	10.55	NW	.415	.334	.355
5	20.2	.5	2.19	W	.168	.211	.208
6	23.4	-3.4	6.12	W	.301	.262	.256
7	21.8	-4.4	4.43	W	.21	.241	.241
8	21	-4.7	9.61	W	.222	.321	.345
9	22.6	-5.5	5.63	W	.271	.26	.262
10	22.5	-7.4	4.69	W	.267	.256	.256
11	19.8	-9.3	5.68	W	.255	.266	.273
12	22.6	-9.6	5.23	W	.265	.268	.261
13	23.1	-10.6	6	W	.303	.28	.28
14	21.3	-12.2	6.3	W	.292	.285	.286
15	21.4	3.9	1.07	W	.155	.199	.199
16	22	.2	7.38	S	.316	.249	.262
17	22.4	3.7	6.48	S	.27	.228	.24
18	20	-9	5.95	SW	.256	.26	.274
19	22.2	3.8	8.05	E	.214	.258	.293
20	22.4	-1	7.64	E	.281	.267	.3
21	22	-4.7	8	E	.26	.284	.309
22	21	-5.6	1.43	E	.236	.234	.228

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des conditions expérimentales et des résultats obtenus .

Afin de visualiser les écarts ,nous avons reporté les valeurs expérimentales en abscisse et en ordonnée les valeurs correspondant soit au modéle detaillé (figure (5a)), soit au modéle simplifié (figure (5b)). Le trait plein représente alors la ligne qui symboliserait le parfait agrément. Les traits pointillés délimitent un faisceau d'incertitude de ± 25 % . Ce pourcentage est en accord avec l'imprécision qui régne sur bon nombre de données (perméabilitè, coefficient de pression ...).

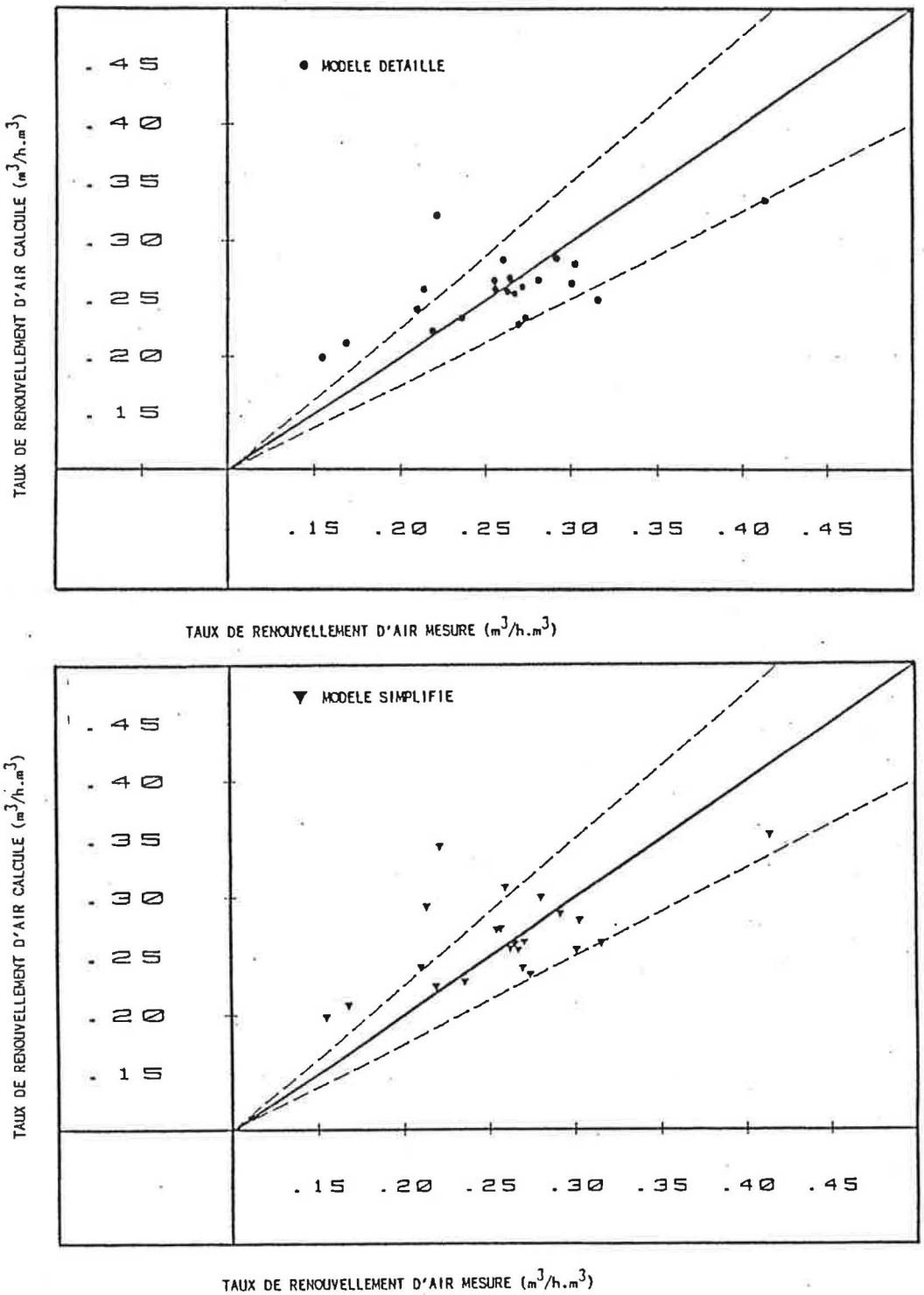


Figure 5 : Confrontation du modéle détaillé (a) et du modéle simplifié (b) avec l'expérimentation

On constate dans les deux cas une bonne tenue des modéles vis à vis de l'expérimentation. Les points qui s'éloignent le plus du trait plein correspondent à des mesures éffectuées avec des vitesses de vent élevées (essai n° 4,8,16). Cela peut prêter à deux types d'interprétation qui d'ailleurs ne sont pas incompatibles :

- Les mesures d'infiltration d'air par gaz traceur sont fortement dependantes des conditions climatiques: par vent violent ces mesures peuvent être entachées d'erreurs importantes.

- Nous avons supposé,faute de mieux,qu'un coefficient de pression moyen par façade pouvait caractériser à lui seul l'écoulement de contournement induit par le vent sur un obstacle. Cette hypothése révele ses limites lorsque la pression dynamique joue un rôle majeur dans le processus d'infiltration.

La comparaison que nous venons de mener ne saurait avoir valeur de validation ,tout au moins pour le modéle detaillé. En effet elle ne s'applique qu'à un type particulier d'habitation individuelle configurée pour la circonstance sous une forme monozone. Il serait intérèssant de pouvoir traiter d'autres cas abordant notamment les problémes de transfert d'air interzones. Malheureusement il n'existe,à notre connaisance,aucune expérimentation de ce type publiée à ce jour.

VI.- Exploitation

Nous avons testé les possibilités offertes par les deux modéles sur un bâtiment construit en 1969 prés de LYON.Ce bâtiment,d'une hauteur totale de 10.95 m, se compose d'un rez-de-chaussée et de deux étages courants. Chaque étage dispose d'un appartement de type F4 auquel est accolé un appartement de type F3.
Pour les besoins de la simulation nous avons modélisé le bâtiment en quatre zones thermiques (figure (6)).Les trois premiéres zones correspondent aux trois appartements de type F4 dont la description géométrique est donnée figure (7).

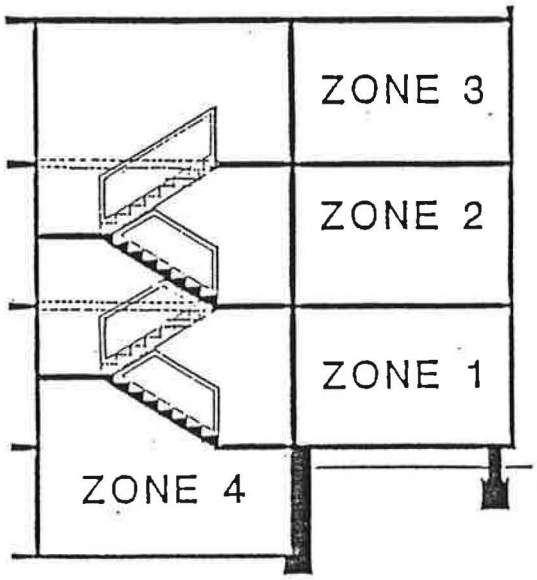


Figure 6 : Découpage en zone du bâtiment

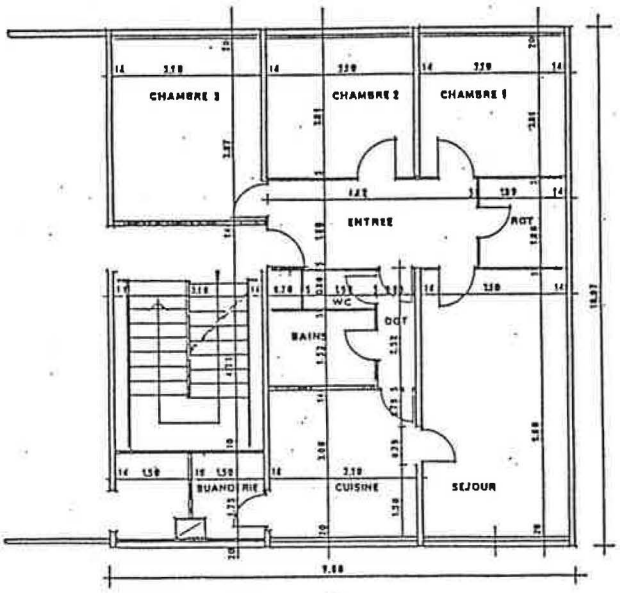


Figure 7 : Description géométrique d'une cellule habitée

La quatriéme zone regroupe le hall d'entrée, la cage d'escalier, ainsi que les différentes piéces de service. Cette zone n'étant pas chauffée, elle évolue librement en température.

Nous avons supposé que toutes les portes et fenêtres étaient closes.

Le fichier climatique utilisé est celui de CARPENTRAS. La simulation s'est deroulée du 21 au 23 décembre de l'année de référence.

Les figures (8a) et (8b) montrent l'évolution horaire du débit volumique pénétrant dans chacune des zones 1 et 4, en l'absence de toute ventilation mécanique .

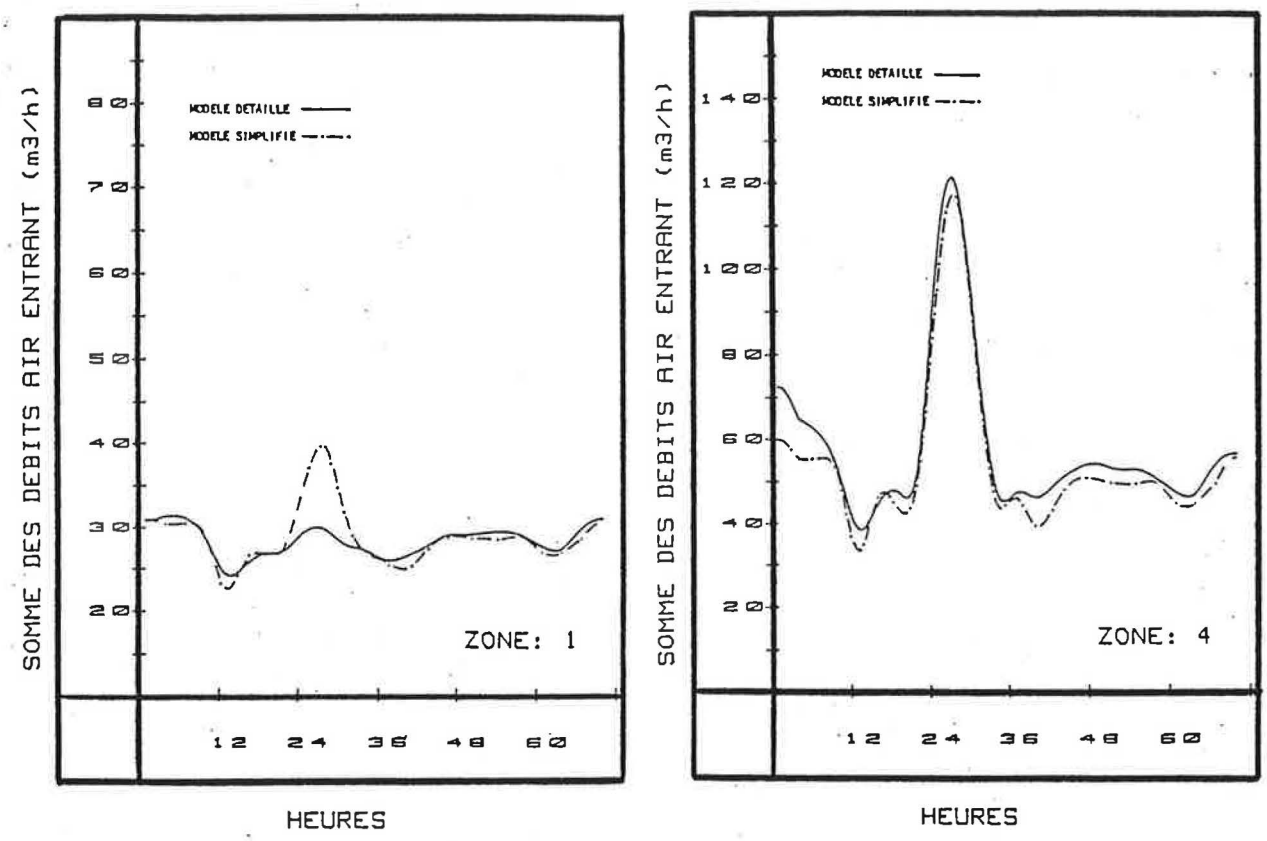


Figure 8 : Evolution horaire de la somme des débits volumiques d'air (m^3/h) pénétrant dans la zone 1 (a) et dans la zone 4 (b)

Nous pouvons faire les remarques suivantes :

- L'influence des infiltrations d'air dans les locaux d'habitation (zones 1,2,3) n'est pas négligeable puisqu'elles peuvent représenter de 0.2 à 0.5 volume heure pour des vitesses de vent comprises entre 0 et 6 m/s .

- Les deux modéles suivent à peu prés la même évolution .Les écarts rencontrés s'expliquent en partie par une répartition différente des débits d'air dans chaque zone .

Nous avons alors étudié la répartition des débits massiques d'air dans le bâtiment . Le modéle simplifié n'étant pas adapté à une telle étude, la simulation s'est faite avec le modéle détaillé .

La maniére dont l'écoulement se répartit dans le bâtiment est visualisée en l'absence (figure (9a)) ou en présence (figure (9b)) d'une ventilation mécanique appliquée individuellement à chaque zone d'habitation .

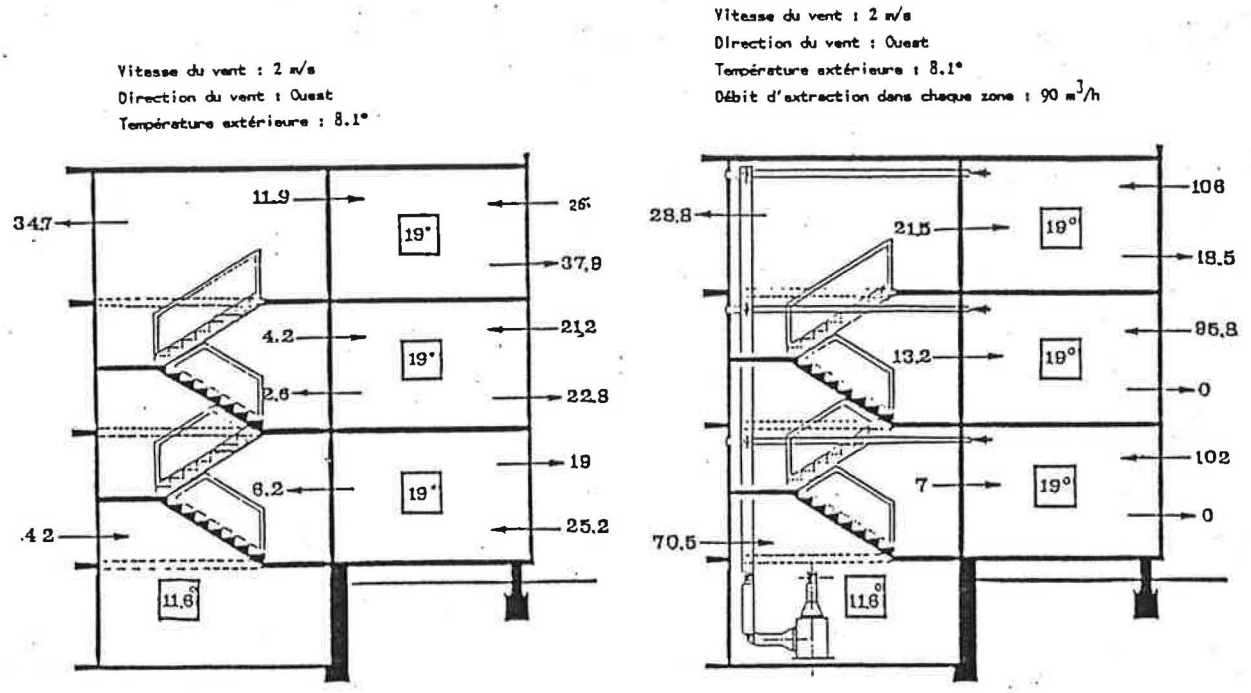


Figure 9 : Répartition des débits massiques d'air (kg/h) dans le bâtiment,en l'absence (a) et la présence (b) d'une ventilation mécanique

On observe que l'extraction mécanique de l'air commence à voir son action perturbée par les infiltrations à partir de la zone 3 , ce qui correspond à une hauteur de 7 m.

VII._ Conclusion

Nous venons d'étudier deux types de modéles qui abordent conjointement le probléme posé par les transferts de masse dans les locaux compartimentés mais à des niveaux différents .

Le premier , désigné sous l'appellation de modéle "détaillé" a étè élaboré avec le dessein d'être aussi exhaustif que possible . Développé en tant qu'outil de recherche appliquée il est parfaitement adapté à l'étude de sensibilité de paramétres . Une version de ce modéle a étè retranscrite sur micro-ordinateur .

Le second , désigné sous l'appellation de modéle "simplifié" a été conçu pour un tout autre but puisqu'il sert surtout à analyser des tendances dans un cadre d'aide à la conception . On a donc privilegié la rapidité d'exécution au détriment d'un champ d'investigation forcément plus limité .

Il convient de pondérer cette étude en remarquant que , bien que les causes physiques et les lois générales qui régissent le phénoméne de la ventilation soient connues (au moins au niveau de l'enveloppe) , les calculs sont rendus hasardeux par la trés grande incertitude régnant sur les valeurs à attribuer aux différents coéfficients (coefficients de pression , coefficients de correction de la vitesse du vent , perméabilité à l'air des logements ...) .

Remerciements .

Le premier modéle évoqué dans cette publication a été développé dans le cadre d'un contrat CSTB-INSA n° 2444

BIBLIOGRAPHIE

[1] A. ROLDAN
"Etude thermique et aéraulique des enveloppes du bâtiment . Influence des couplages internes et du multizonage ."
Thése de Doctorat , INSA LYON , Decembre 1985

[2] A. ROLDAN , F. ALLARD , G. ACHARD
"Influence des infiltrations et des transferts aérauliques entre piéces sur la charge thermique d'un bâtiment multizone"
ICBEM'87 , Tome 3 , LAUSANNE , Octobre 1987

[3] TRNSYS
"A transient simulation program ."
University of Wisconsin , Madison , Juin 1979

[4] D. CACCAVELLI , J.J. ROUX , J. BRAU
"Modélisation simplifiée du comportement thermique d'un bâtiment multizone . Prise en compte des phénomènes de ventilation naturelle ."
Revue Générale de Thermique , N° 311 , Novembre 1987

[5] D. CACCAVELLI , J.J. ROUX , A ROLDAN
"Infiltration , Air flow distribution and Micro-computation."
ROOMVENT-87 , Session 4a , STOCKHOLM , June 1987

[6] G. GUYOT
"Les profils de vitesse de vent au voisinage du sol ."
PROMOCLIM E , N°1 , Mars 1976

[7] M.H. SHERMAN , D.T. GRIMSRUD , R.G. DIAMOND
"Infiltration-Pressurization correlations : Surface pressure and terrain effects ."
ASHRAE Transaction ,Part 2 , 1979

[8] C. MOYE
"La perméabilité à l'air des bâtiments d'habitation ."
Cahier de CSTB N° 2019 ,Livraison 262 ,Septembre 1985

[9] M. KILBERGER
"Perméabilité à l'air des logements neufs ."
C.E.T.E. LYON , 83/110 HEB , 1983

[10] G.N. WALTON
"Calculation of inter-room air movement for multi-room building energy analysis ."
N.B.S. I.R 81-2404 _ Washington D.C 20234 ,Nov. 1981

[11] G. GOUIN
"Contribution aérodynamique à l'étude de la ventilation naturelle de l"habitat en climat tropical humide . "
Thése de 3'ème cycle , Université de Nantes , Février 1984

[12] E. KREYSIG
"Advanced engineering mathematics . "
Wiley (4th edn) , New_York , 1979

[13] A. ROLDAN , G.ACHARD
"Creation d'une modélothéque en thermique de l'habitat - Contribution à l'élaboration du Proforma ."
Contrat INSA LYON - CSTB N° 2654 , Février 1986

[14] R. CADIERGUES
"Méthode d'étude de la ventilation naturelle . "
PROMOCLIM E , TOME 8E , N° 5 , Decembre 1977

[15] ASHRAE Fundamentals 1985
Chapter 22 , pp 22.1, 22.18

[16] C.Y. SHAW , G.T. TAMURA
"Mark XI Energy Research Project : Airtighness and Air Infiltration Measurements ."
Building Res. Note N° 162 , June 1980

[17] R.L. QUIROUETTE
"The Mark XI Energy Research Project : Design and Construction . "
Building Res. Note N° 131

[18] M. LIDDAMENT , C.ALLEN
"The validation and comparison of mathematical models of air infiltration ."
Technical Note AIC 11
Air Infiltration Centre , September 1983

[19] E. DAHOME
"Modélisation thermique du bâtiment . Influence d'une modélisation fine des échanges radiatifs et aérauliques ."
Thése de Docteur-Ingénieur , INSA LYON , Septembre 1983