# ÉTUDE DE LA VENTILATION D'UN BÂTIMENT A L'AIDE DE MODÈLES SIMPLIFIÉS

A. Bastide, F. Garde, L. Adelard and H. Boyer
Laboratoire de Génie Industriel Équipe Génie Civil,
Université de La Réunion, 97410 Saint Pierre, France
alain.bastide@univ-reunion.fr francois.garde@univ-reunion.fr

RÉSUMÉ

Dans les climats chauds et humides, la ventilation naturelle prend une part importante dans l'accession au confort des occupants. Afin d'évaluer des indices de confort thermique adaptés à ce type de climat, il est nécessaire de connaître les vitesses d'air dans le bâtiment. Une méthode est d'avoir recours à des modèles simplifiés. Ces modèles sont le plus souvent déterminés à une hauteur (ou côte) fixe.
Le modèle simplifié décrit dans cet article tend à donner une valeur de vitesse pour un bâtiment donné, afin d'évaluer le confort thermique à différentes hauteurs, pour différents volumes. Il permet, de plus, d'optimiser le pourcentage de volume confortable dans un volume d'étude.

NOMENCLATURE

| | | |
|---|---|---|
| $V(z)$ | : | Vitesse à la hauteur z |
| $z_{ref}$ | : | Hauteur de référence |
| $V_{ref}$ | : | Vitesse de référence amont à $z_{ref}$ |
| $L$ | : | Hauteur du bâtiment |
| $U_L$ | : | Vitesse de référence à l'altitude $L$ |
| $U_i$ | : | Vitesse moyenne d'indice $i$ |
| $u_i$ | : | Fluctuation de la vitesse d'indice $i$ |
| $\nu$ | : | Viscosité cinématique |
| $1/\alpha$ | : | Type de terrain |
| $v_t$ | : | Volume total considéré |
| $v_c$ | : | Volume total d'une couche étudiée |
| $v_i$ | : | Volume d'une cellule CFD |
| $\overline{V_i}$ | : | Amplitude de la vitesse moyenne dans la cellule i |
| $N$ | : | Nombre de cellules total |
| $N_V$ | : | Nombre de fois où $V_i$ est rencontrée |
| $C_V$ | : | Coefficient adimensionnel de vitesse |
| $V_{i_{min}}$ | : | Vitesse minimale |
| $V_{i_{max}}$ | : | Vitesse maximale |
| $C_{V_{max}}(z)$ | : | $C_V$ maximal à la hauteur $z$ |
| $h_f$ | : | Hauteur de l'encadrement |
| $H_f$ | : | Hauteur de la fenêtre |
| $f(V_i)$ | : | Fréquence de $V_i$ |
| $P$ | : | Pourcentage de volume confortable |

## INTRODUCTION

Les modèles simplifiés servent à obtenir des résultats rapides et fiables répondant à un problème donné. Ces modèles sont soit issus d'expérimentations sur maquettes, soit issus d'expérimentations numériques.
Les résultats détaillés obtenus à partir d'expérimentations numériques permettent de connaître, par exemple, le champ de vitesses dans une pièce en un grand nombre de volumes de contrôle. De ce fait, il est possible de connaître la vitesse moyenne dans le volume de cette même pièce. Le problème à $N$ noeuds de la mécanique des fluides est donc rapporté à un problème à un ou quelques noeuds. La méthodologie définie dans ce travail suit cette technique d'obtention de résultats qui est couramment utilisée par de nombreux auteurs Ernest[1], Gouin[2], Sangkertadi[3], Kindangen[4].
Les auteurs prés cités étudient de nombreuses configurations de bâtiments en soufflerie à couche limite pour Ernest[1] et Gouin[2], et avec la mécanique des fluides numérique pour Sangkertadi[3] et Kindangen[4]. Leurs domaines d'études sont des bâtiments mono-zones et multi-zones vides et des bâtiments multi-zones avec mobilier. Les auteurs définissent ainsi des prescriptions pour améliorer la ventilation à l'intérieur de leurs espaces étudiés. Ils établissent des relations adimensionnelles, ou modèles simplifiés, permettant de relier la vitesse d'air dans une couche horizontale fixe (côte fixe) passant par le centre des ouvrants à une vitesse extérieure.
L'ensemble de ces travaux a pour objectif une intégration dans des codes de simulation dynamique horaire de thermique du bâtiment. Le but est de fournir des vitesses d'air moyenne qui puisse permettre le calcul d'un indice de sensation thermique : PMV*, DISC [5, 6].

Dans cette étude, nous nous intéressons à la variation des coefficients adimensionnels dans une couche horizontale fixe, mais aussi en fonction de la hauteur à l'intérieur d'un cube de 3m de côté.
Un modèle mathématique basé sur les statistiques est développé et tend à estimer un pourcentage de volume confortable dans une pièce. De plus, ce modèle permet de vérifier si la ventilation doit être améliorée en augmentant la dimension des ouvrants, ou en prescrivant la modification du type d'ouvrant.

Dans un premier temps, les aspects liés à la mise en place de l'expérimentation numérique sont présentés. Dans un second temps, la méthodologie visant à construire un modèle simplifié est développée. Enfin, ce modèle mathématique est intégré dans une code de simulation thermo-aéraulique multi-zones, puis appliqué à un cas test de bâtiment afin d'optimiser le confort thermique et la ventilation naturelle.

## EXPÉRIMENTATION NUMÉRIQUE

### a- Modèle de turbulence

Cette section a pour but de présenter le modèle de turbulence et la méthode numérique utilisée, ainsi que le maillage et les conditions limites du domaine de calcul et du bâtiment modélisé.

L'air est traité comme un fluide incompressible avec des propriétés physiques constantes [3, 4]. En outre, l'écoulement à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment est considéré comme un écoulement thermiquement stable à 25°C. En conséquence, le problème physique peut-être décrit par les équations moyennées de Navier-Stokes (RANS) et l'équation de continuité. L'équation de continuité et les équations de transport des vitesses sont données ci-dessous sous une forme tensorielle en coordonnées Cartésienne :

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\rho\frac{\partial U_j}{\partial t} + \rho U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\Big[\mu\Big(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\Big)\Big] - \frac{\partial}{\partial x_j}\Big(\rho\overline{u_i u_j}\Big) \tag{2}$$

Ces équations contiennent le terme des contraintes de Reynolds $\overline{u_i u_j}$. Ce terme doit être modélisé afin de résoudre ces équations. La qualité de la solution numérique dépend donc du choix de l'ensemble des équations servant à modéliser ce terme additionnel.
Par conséquent, les termes du tenseur de Reynolds ont l'expression suivante en utilisant l'hypothèse de viscosité turbulente, $\nu_t$, de Boussinesq :

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_t\Big(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\Big) + \frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{3}$$

$$\nu_t = C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

Le modèle RNG-k-$\varepsilon$ [7] qui a été utilisé dans cette étude dérive du modèle à deux équations de fermeture : k-$\varepsilon$ standard [8]. Ces modifications découlent de la méthode développée par le groupe de renormalisation [9].
Le modèle de turbulence RNG-k-$\varepsilon$ est connu pour être relativement performant dans la classe des modèles RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) pour la résolution du champs de vitesses dans l'étude d'écoulements à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment. Néanmoins, dans le cas de l'étude des écoulements autour d'obstacles cubiques (sans ouvertures) Rodi [10] montre que le modèle donnant une solution se rapprochant le plus de l'expérience est un modèle de la classe LES, (Large Eddy Simulation) comparé à des modèles de la classe RANS. Les modèles LES nécessitent un temps de calcul très nettement supérieur aux temps de calculs des codes RANS, nous faisons donc un compromis entre le temps de calcul et la qualité de la solution. Notre choix c'est donc porté sur le modèle RNG-k-$\varepsilon$.
Par conséquent, les deux équations de fermeture du modèle RNG-k-$\varepsilon$ sont les suivantes :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j\frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\Big[\Big(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\Big)\frac{\partial k}{\partial x_j}\Big] + P_k - \varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\Big[\Big(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\Big)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\Big] + C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}P_k - C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} + R \tag{6}$$

La modification apportée au modèle k-$\varepsilon$ standard est située dans l'équation de transport du taux de dissipation de l'énergie turbulente $\varepsilon$ (eqn.6). Un terme additionnel $R$ est ajouté pour réduire l'effet du terme $C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k}$ et pour réduire la production d'énergie turbulente pour $\eta > \eta_0$.
Ci-dessous est donné l'expression du terme de production d'énergie turbulente $P_k$, due aux gradients de vitesses moyennes, et du terme $R$ :

$$P_k = \nu_t\Big(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\Big)\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \tag{7}$$

$$R = \frac{C_\mu\eta^3(1-\frac{\eta}{\eta_0})}{1+\chi\eta^3}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{8}$$

$$\eta = 2(S_{ij}S_{ij})^{\frac{1}{2}}\frac{k}{\varepsilon} \tag{9}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\Big(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\Big) \tag{10}$$

Les constantes introduites dans ces équations de transport sont celles définies par le groupe de renormalisation [9] : $C_{\varepsilon 1} = 1.42$, $C_{\varepsilon 2} = 1.68$, $C_\mu = 0.085$, $\eta_0 = 4.38$, $\chi = 0.012$, $\sigma_k = 0.719$, $\sigma_\varepsilon = 0.719$

b- Méthode Numérique

Toutes les simulations ont été réalisées en utilisant une méthode de volumes finis (FVM). StarCD [7] est utilisé pour modéliser l'écoulement tridimensionnel en régime dynamique. Le domaine est subdivisé en un nombre fini de volumes de contrôle, et les équations non-linéaires de transport sont transformées en une série d'équations algébriques pour chaque volume de contrôle. Les termes convectifs sont discrétisés suivants un schéma TVD (Total Variational Diminishing), préférée aux schémas UPWIND qui sont diffusifs et aux schémas d'ordre plus élevés qui peuvent osciller et donner des solutions non physiques. Un solveur implicite est utilisé couplé à une méthode algébrique multi-grille (AMG), afin de tenter de limiter le nombre d'itérations à chaque pas de temps. Un schéma implicite en temps est utilisé et le pas de temps choisi est tel que le nombre de Courant soit $C = \frac{U\Delta t}{\Delta x} \sim 3$.
Une solution stationnaire est obtenue, à l'intérieur du bâtiment, en moyenne pour environ 3000 pas de temps. Dans le cas où les vitesses incidentes sur le bâtiment ont une direction (0°, 90°) qui coïncide avec un plan de symétrie alors la solution se stabilise à la fois à l'intérieur et à l'extérieur. Dans les cas où les vitesses incidentes (30°, 45°,60°) sur le bâtiment ont une direction qui ne coïncide pas avec un plan de symétrie, l'écoulement à l'extérieur reste instable et ne tend pas à se stabiliser,

alors que les vitesses à l'intérieur se stabilisent ou oscillent faiblement autour d'une valeur moyenne.

c- Maillage et conditions limites

Notre modèle cubique de bâtiment de hauteur $L = 3m$ est placé dans une couche limite atmosphérique turbulente. Le nombre de Reynolds basé sur la vitesse amont $U_L$ du cube à la hauteur $L$ a pour valeur $19 \times 10^4$. Le domaine de calcul est tel que celui présenté sur la figure 1.

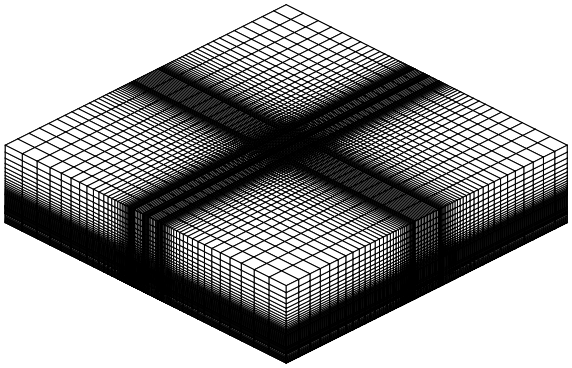

Figure 1 : Maillage du domaine de calcul et de la pièce du bâtiment modélisé

Les dimensions du domaine de calcul sont $10L$×$10L$×$4L$ (LxlxH). Le maillage présenté est raffiné au niveau des parois intérieures et extérieures et du sol. Les zones de forts gradients (aval du bâtiment, intérieur du bâtiment et toit) sont, elles, plus raffinées. Dans cette étude, trois maillages ont été utilisés pour chaque angle d'incidence (angle formé entre la normale extérieure à une ouverture et la direction du vent). Un premier maillage extérieur au bâtiment est obtenu en reproduisant le cas test du cube fermé et immergé dans un écoulement [10]. Ensuite, le maillage intérieur et le maillage des ouvertures sont définis puis raffinés jusqu'à ce que la solution soit indépendante du maillage.

Les parois et sols sont considérés comme lisses dans la suite de cette étude.

Le bâtiment, situé au centre du domaine de calcul, comprend deux fenêtres positionnées en vis-à-vis et au centre des faces. Ces fenêtres sont de dimensions standards : 1mx0.1mx1m (LxlxH). La hauteur d'allège est de 1m.

Les conditions limites en entrée du domaine sont permanentes et les variables du modèle de turbulence sont fixées. La vitesse horizontale est définie par la loi en puissance $V(z)/V_{ref(z_{ref})} = (z/z_{ref})^{1/\alpha}$ où le coefficient $\frac{1}{\alpha}$ est de $0.143$, ce qui représente un terrain de type rural [11]. Les quantités $k$ et $\varepsilon$ sont définies par $k = \frac{3}{2} I_t^2 U^2$ et $\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{l}$. La référence de l'intensité de la turbulence $I_t$ est prise à 10m d'une valeur de $20\%$. La longueur de mélange, $l$, est fixée comme le $1/10$ de la longueur de référence $L$.

Les conditions limites en sortie sont définies en pression avec les gradients de $k$ et $\varepsilon$ nuls sur ces frontières et les vitesses libres.

Cermark [12] montre que l'écoulement à l'intérieur d'un bâtiment est indépendant du nombre de Reynolds ($Re = U_L L/\nu$), dès lors que celui-ci est supérieur à 20000. La vitesse de référence $V_{ref}$ est telle que ce critère est respecté dans la suite de cette étude. En conséquence, une simulation à une vitesse de référence donnée est réalisée pour chaque angle d'incidence. Pour les autres valeurs de vitesses de référence, il suffit donc de multiplier les résultats obtenus par une nouvelle vitesse de référence.

b- Quelques résultats de simulations numériques

Nous présentons ici quelques résultats issus des simulations numériques.

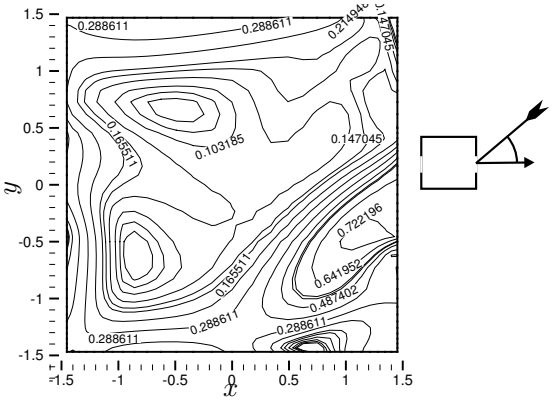


Figure 2 : Iso-contours horizontaux de $||\vec{V}||$ à l'altitude $L/2$ , pour une vitesse de référence de $0.8m/s$, un angle d'incidence du vent de 30°

Sur la figure 2, les vitesses d'air les plus importantes sont obtenues à l'ouverture et à proximité des murs. Ceci s'explique par le caractère tridimensionnel de l'écoulement. Les flux d'air entrent avec un angle d'incidence de 30° puis rencontrent un mur. L'écoulement peut être assimilé à un jet projeté sur une paroi inclinée et se propage le long des murs. Les amplitudes les plus faibles sont quant à elles observées au centre du volume.

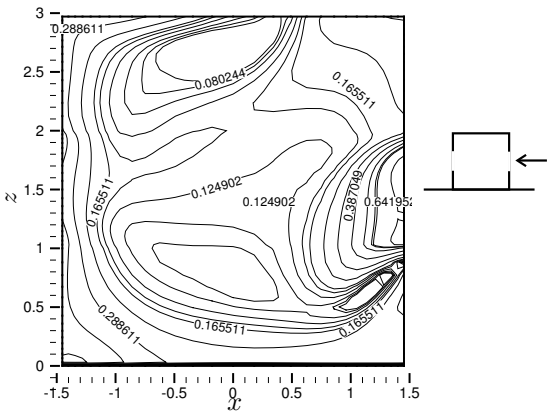


Figure 3 : Iso-contours verticaux de $||\vec{V}||$ dans plan de symétrie vertical passant par les fenêtres pour un angle d'incidence de 30°

La figure 3 nous montre que l'écoulement en entrée se dirige vers la partie basse de la pièce puis le long du sol. Nous retrouvons les mêmes phénomènes que ceux décrit sur la figure 2.

## MÉTHODOLOGIE - DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE SIMPLIFIE

Dans cette partie est développée une méthode permettant d'évaluer le pourcentage de volume confortable d'une pièce et à l'optimiser.

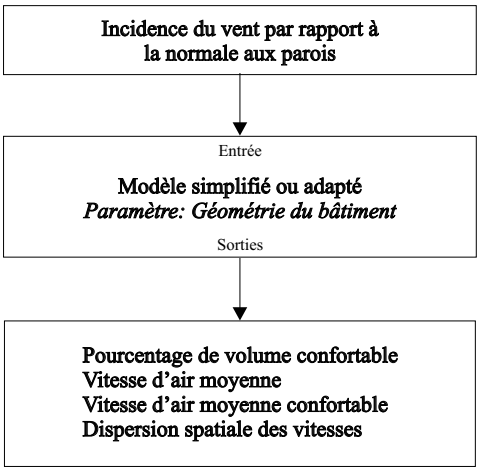


Figure 4 : Entrée, sorties et paramètres du modèle simplifié

Ci-dessus est représenté le modèle, ses entrées-sorties et ses paramètres de fonctionnement. Dans cette section, nous développerons les aspects qui permettent l'obtention de chaque sortie en fonction des paramètres et des entrées.

L'indice $DISC$ [5, 6] a été choisi comme indice de confort thermique car il est plus adapté au climat tropical (Kindangen [4]).
L'indice d'inconfort DISC prédit que, pour des conditions thermiques et de vents données, le confort thermique est atteint pour $DISC\epsilon[0; 0.3]$. Lors d'une simulation avec un code de thermique du bâtiment, l'indice DISC est calculé à l'aide d'une vitesse moyenne à l'intérieur du cube. Cette valeur de vitesse est évaluée grâce à un modèle simplifié. La valeur du $DISC$ peut alors se trouver en limite confortable.
Nous nous intéressons au volume confortable par rapport au volume total étudié, en d'autres termes, il s'agit du volume où l'indice $DISC$ est compris entre 0 et 0.3 par rapport au volume total étudié.
Un indice de confort thermique est lié aux conditions thermiques et à la vitesse de vent. Connaissant l'encadrement de l'indice d'inconfort $DISC\epsilon[0; 0.3]$ et les conditions thermiques du cube, les vitesses telles que $DISC(V) = 0.0$ et $DISC(V) = 0.3$ sont évaluées $V_{min} = min(V)$ et $V_{max} = max(V)$.
Ces deux vitesses forment un encadrement tel que les valeurs du $DISC$ sont comprises entre 0.0 et 0.3.
Pour chaque vitesse, le volume associé à une vitesse est connu grâce à la mécanique de fluides numérique. Le volume et le pourcentage de volume où l'inconfort thermique est minimal peut donc être évalué.
La méthodologie adoptée pour la construction du modèle simplifié est la suivante :

1. calcul du coefficient moyen de vitesses moyennes locales $C_{V_i}$. Il permet d'évaluer la vitesse moyenne dans une cellule du maillage de la mécanique des fluides ;
2. calcul du coefficient maximal de vitesses moyennes $C_{V_{max}}$. Il permet de normaliser les $C_{V_i}$ afin de représenter les distributions cumulées de vitesses sur une même échelle ;
3. calcul des fréquences cumulées pour chaque vitesse normalisée. Elle sert à évaluer la moyenne, l'écart type, un pourcentage de volume confortable ;
4. calcul de la moyenne et de l'écart type à partir de la représentation précédente ;
5. calcul du pourcentage de volume confortable.

Les distributions cumulées permettent de mettre en relation une observation et sa fréquence associée. Il est donc possible de relier la vitesse à sa fréquence au moyen de ce type de distribution. Dans le cas de données extraites de la mécanique des fluides numérique, la fréquence a, pour une couche donnée, la forme suivante :

$$f(V_i) = \sum_{i=1}^{N_V} \frac{v_i}{v_c} \tag{11}$$

$f(V_i)$ représente la somme des volumes rapporté au volume considéré $v_c$ où $V_i$ est obtenue.

### 1. Calcul du coefficient moyen

Une première étape est la construction du coefficient adimensionnel de vitesses adapté au maillage de la mécanique des fluides. Il est évalué en chaque cellule suivant la formule ci dessous :

$$C_{V_i} = \frac{\overline{V_i}}{V_{ref}(z_{ref})} \tag{12}$$

Pour un volume étudié, le coefficient $C_V$ est obtenu en pondérant $C_{V_i}$ par le volume de la cellule rapporté au volume étudié :

$$C_V = \frac{1}{v_e} \sum_{i=1}^{N} C_{V_i} v_i \tag{13}$$

Cette fonction constitue la première sortie du modèle dans un code de simulation de bâtiment.

### 2. Calcul du coefficient moyen maximal par couche

Afin de pouvoir comparer les distributions obtenues pour différentes hauteurs, elles sont normalisée par la valeur maximale calculée à une hauteur fixée (eqn. 14).

$$C_{V_{max}}(z) = max(C_{V_i}(z)) \tag{14}$$

Sur la figure 5, les $C_{V_{max}}$ sont représentés pour des hauteurs telles que $0.2 < z < 2.2$. Ces hauteurs constituent un espace de vie (domaine d'évolution des occupants). Nous pouvons observer que deux points d'inflexion sont présents aux niveaux de la hauteur d'allège et en partie haute de la fenêtre. La valeur maximale du $C_{V_{max}}$ est présente au voisinage de la hauteur d'allège. De plus, nous pouvons constater que les valeurs les plus importantes sont obtenues pour les angles de $45°$ et $60°C$.

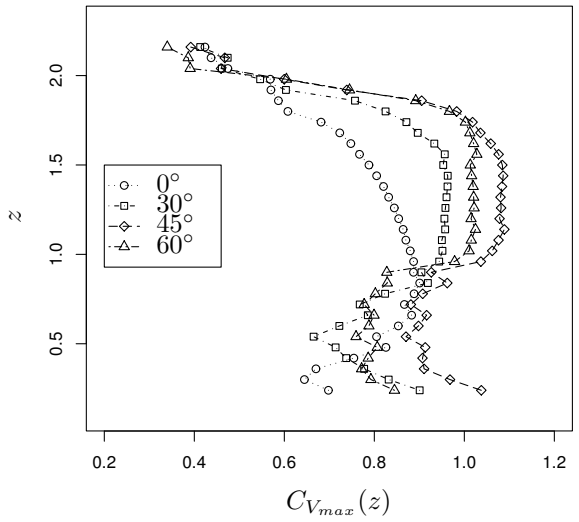


Figure 5 : Variation de $C_{V_{max}}$ en fonction de z pour quatre angles d'incidence

Ceci nous a conduit à définir une fonction de $C_{V_{max}}(z)$ fonction de la hauteur. Cette relation permet de lier $C_{V_{max}}(z)$ à la hauteur d'allège et la hauteur de la fenêtre. Pour les valeurs de $h_f$ et $H_f$ du cas traité, on obtient :

$$C_{V_{max}}(z) = \alpha_1 \tanh\left(\frac{z - h_f}{\alpha_2}\right) + \alpha_3 \tanh\left(\frac{z - (h_f + H_f)}{\alpha_4}\right) \quad (15)$$

Les valeurs des $\alpha_i$ sont obtenues à l'aide de l'algorithme de régression non-linéaire (Levenberg-Marquardt [13]) et sont évalués pour chaque cas. Les coefficients $\alpha_i$ sont donc dépendants de la géométrie de notre bâtiment et de l'angle d'incidence du vent sur le bâtiment. Cette sortie du modèle dépend à la fois de la hauteur d'allège et de la hauteur de la fenêtre.

3. Calcul des fréquences cumulées

La distribution statistique cumulée est construite à partir des $C_{V_i}$ et $C_{V_{max}}$ pour des couches d'air à différentes hauteurs. Nous montrons par la suite que cette représentation permet d'accéder au volume d'air où les vitesses sont comprises entre une valeur minimale $V_{i_{min}}$ et une valeur maximale $V_{i_{max}}$. A l'aide de l'équation (14) et de l'équation (13), nous établissons la relation suivante :

$$B_i(z) = \frac{C_{V_i}(z)}{C_{V_{max}}(z)} \quad (16)$$

Cette expression représente la valeur du coefficient de corrélation de vitesses moyennes normalisée à la hauteur z. Une représentation de la distribution des $B_i(z)$ est donnée sur la figure 6. Plusieurs modes sont présents et localisés à différents endroits. Nous pouvons remarquer que pour les $z$ petits (bas de la pièce) la distribution est plus étalée que pour les parties hautes. Ceci signifie que les vitesses en partie basse sont plus hétérogènes que dans la partie haute où des vitesses sont majoritaires.
Dans le but de réduire la complexité du modèle simplifié, la distribution cumulée des $B_i(z)$ a été préférée (Figure 7).

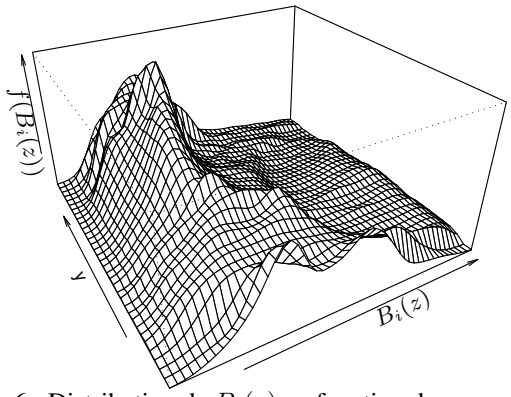


Figure 6 : Distribution de $B_i(z)$ en fonction de z pour un angle d'incidence nul

Sur la figure 7, nous pouvons remarquer que la forme de la distribution est plus simple à modéliser que les distributions de la figure 6.

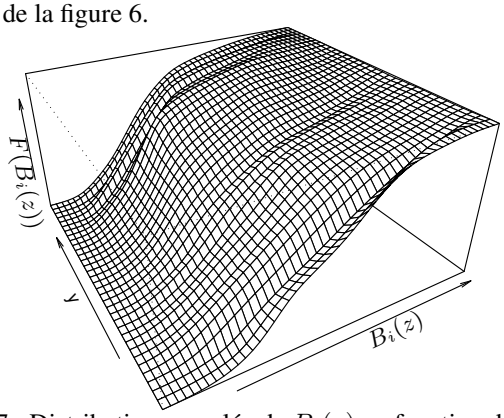


Figure 7 : Distribution cumulée de $B_i(z)$ en fonction de z pour un angle d'incidence nul

La distribution cumulée est calculée couche par couche à chaque hauteur selon la relation suivante :

$$F(B_i(z)) = \sum_{X=0}^{B_i(z)} f(X) \quad (17)$$

Après de nombreux tests, une relation est définie. Cette relation permet de définir la distribution cumulée en utilisant un minimum de paramètres et en respectant au mieux l'allure de la courbe.

$$F(x, a, s, \beta_i) = \frac{\int_0^x t^{a-1} e^{-t/s} dt}{\int_0^1 t^{a-1} e^{-t/s} dt} + (x-0)(x-1)(x-\beta_1)(x-\beta_2)(x-\beta_3) \quad (18)$$

La première ligne correspond à la fonction trouvée pour de faibles hauteurs, elle correspond à un mode majoritaire dans la distribution de vitesses, les $\beta_i$ sont alors tels que le polynôme est négligeable.
Les deux lignes suivantes permettent de compenser les différents modes observés dès que la hauteur dépasse ou s'approche de la hauteur d'allège.
Les différents coefficients sont obtenus à l'aide d'un algorithme génétique développé Wall[14]. Ils sont obtenus pour chaque cas étudié et dépendent des paramètres du problème. L'algorithme génétique tend à minimiser une fonction "objectif" définie par l'utilisateur.
Cette fonction objectif calcule le carré des écarts entre le modèle et les données extraites selon les méthodes précédemment citées.
Le modèle est testé afin de respecter la définition d'une distribution cumulée. Deux tests sont effectués, le premier consiste à calculer la dérivée $\partial F(C_{V_i}(z)/C_{V_{max}}(z))/\partial(C_{V_i}(z)/C_{V_{max}}(z))$ et à accepter le jeu de coefficients si les valeurs sont positives ou nulles, ceci a pour but de limiter des oscillations indésirables dues au polynôme. Le deuxième consiste à vérifier que le domaine de variation est tel que $F(x, a, s, \beta_i)\ \epsilon\ [0; 1]$.
Les tests sont effectués pour chaque jeu de coefficients afin d'extraire le meilleur jeu.
Le modèle simplifié de la distribution cumulée lie les coefficients de vitesse aux fréquences comme nous l'avons défini précédemment. Donc si on se fixe une valeur de vitesse $V_i$, il est possible de connaître la fréquence cumulée à partir de la relation (18). La valeur de $F(V_i)$ représente alors la quantité suivante :

$$F(V_i) = \sum_{X=0}^{V_i} f(V_i) \tag{19}$$

$$F(V_i) = \sum_{X=0}^{V_i} \sum_{i=1}^{N_V} \frac{v_i}{v_c} \tag{20}$$

$$F(V_i) = \frac{1}{v_c} \sum_{X=0}^{V_i} \sum_{i=1}^{N_V} v_i \tag{21}$$

Les valeurs de $f(V_i)$ sont reconstruites à partir de la fonction $F(V_i)$ moyennant un algorithme.
La quantité $F(V_i)$ représente le pourcentage du volume où la vitesse est inférieure ou égale à $V_i$. Il est donc possible de connaître le pourcentage de volume où la vitesse est comprise entre deux valeurs $V_{min}$ et $V_{max}$.

4. Calcul de la moyenne et de l'écart type

A l'aide de l'équation (18) peuvent être retrouvés les modèles simplifiés définis par Ernest[1] :

– le coefficient de corrélation de vitesse moyenne qui permet de retrouver la vitesse moyenne dans une couche d'air : La vitesse moyenne :

$$V_{moy} = \sum_{i=0}^{N} V_i f(V_i) \tag{22}$$

– l'écart type du coefficient $C_{V_i}$ une couche d'air qui permet d'estimer sa dispersion spatiale. L'écart type du coefficient $C_{V_i}$ :

$$\sigma_{C_V} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N} f(V_i)(C_{V_i} - C_{V_{moy}})^2}{N}} \tag{23}$$

5. Calcul du pourcentage de volume confortable

Sous les climats tropicaux, la ventilation doit être optimisée pour faire en sorte que les occupants d'habitation soient en situation de confort thermique ou que l'inconfort soit minimal. Dans cette optique, le modèle simplifié précédemment défini est couplé aux indices de confort et d'inconfort.
Nous faisons l'hypothèse que le bâtiment est suffisamment ventilé de telle sorte que les gradients de température d'air et d'humidité relative soient faibles dans le volume d'air.
Connaissant les paramètres liés à l'occupant $(Clo, Met, W)$, les paramètres intérieurs $(Ta, Trm, Hr)$ et un encadrement de l'indice de confort thermique $DISC$ : $0.0 < DISC(Clo, Met, W, Ta, Trm, Hr, Va, te) < 1.0$, un encadrement de la vitesse est déduit. Les paramètres thermiques intérieurs sont évalués à partir du code de calcul thermo-aéraulique multi-zones [15].
Cet encadrement permet de calculer une vitesse minimale $V_{min}$ et une vitesse maximale $V_{max}$ qui sont respectivement les limites minimale et maximale de la vitesse qui permettent l'accession au confort thermique à partir de l'optimisation de la ventilation.
Deux points sont à noter :

- o suivant les conditions thermique du bâtiment, les valeurs minimales de vitesse ne sont pas forcement telles que : $DISC(V_{min}) = 0.0$. Des valeurs inférieures à $0.0$ peuvent être obtenues ;
- o la valeur supérieure de la vitesse $V_{max}$ peut être très nettement supérieure à une limite acceptable qui peut varier entre $1m/s$ et $3m/s$ suivant les personnes et leur activité.

A l'aide des équations (18) (15) et du $DISC$, un pourcentage de volume confortable dans un volume de la pièce est donné. La forme réduite prend alors la forme :

$$P = F(V_{max}) - F(V_{min}) \tag{24}$$

Les valeurs de $V_{min}$, $V_{max}$ et $P$ permettent de définir des prescriptions permettant d'améliorer le confort thermique.

SIMULATIONS

Le bâtiment étudié est le cas d'étude précédemment cité : un cube de 3m de côté. Il est modélisé sous un environnement classique de calcul de thermique de bâtiments. Le code de calcul résout à la fois les aspects thermiques et aérauliques.
Le bâtiment est en béton, les parois intérieures et extérieures sont de couleur blanche.

L'étude se porte sur une journée type ou le rayonnement direct dépasse $900W/m^2$, le rayonnement diffus dépasse $200W/m^2$, la température extérieure est comprise entre $27.4°C$ et $18.6°C$, l'humidité entre $54\%$ et $81\%$, le vent extérieur entre $1m/s$ et $10m/s$. L'évolution horaire de ces paramètres est donnée sur les figures 8 et 9.

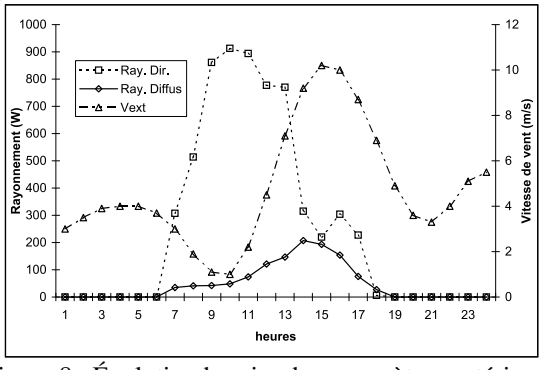


Figure 8 : Évolution horaire des paramètres extérieurs (Rayonnement direct, diffus et vitesse de vent)

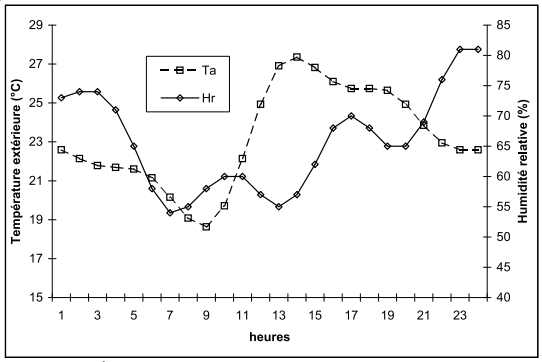


Figure 9 : Évolution horaire des paramètres extérieurs (Température et humidité)

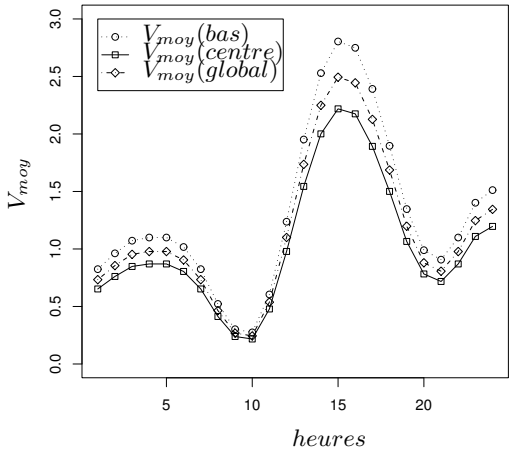


Figure 10 : Vitesses moyennes dans trois volumes différents

Trois volumes sont utilisés pour cette étude :

- le premier se situe proche du sol : $0.2 < z < 0.4$. Ce volume correspond à un volume où une personne se trouve allongée par exemple sur un lit ;
- le second se situe au centre de la pièce : $1.5 < z < 1.55$ . Ce volume correspond au type d'études de Ernest[1], Gouin[2], Sangkertadi[3], Kindangen[4] ;
- le dernier est un volume global : $0.2 < z < 2.2$.

Sur la figure 10, les vitesses moyennes dans les trois volumes d'études définis précédemment sont représentées. Les vitesses moyennes maximales sont obtenues dans la partie basse du cube. Les vitesses moyennes minimales sont obtenues dans la partie centrale. Ceci indique que les vitesses ne sont pas homogènes dans le volume. L'air entrant dans le cube circule principalement dans la partie basse du cube.

L'étude portant sur les vitesses moyennes (qui se situe au centre du cube) sous estime ces valeurs en partie haute et basse de la pièce.

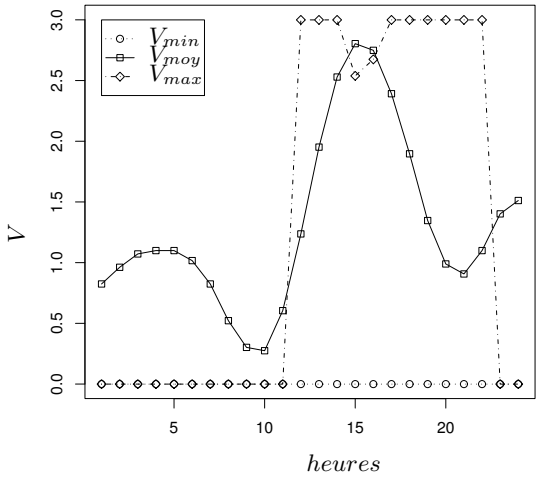


Figure 11 : Vitesses min, moyennes, max dans un volume proche du sol

Sur la figure 11, le volume proche du sol est étudié. Nous faisons l'hypothèse que l'occupant n'est pas gêné par des vents compris entre $0m/s$ et $3m/s$. Ceci constitue le domaine d'exploration des valeurs des vitesses de notre algorithme.

Entre $00h$ et $11h$, $V_{min}$ et $V_{max}$ sont nulles. Ceci signifie que l'augmentation de la ventilation est inutile pour améliorer le confort des occupants. Le bâtiment doit être modifié pour agir sur des paramètres autres qu'aérauliques. Dans ce cas, le bâtiment doit être optimisé en faisant varier la composition des murs et du toit.

Entre $12h$ et $14h$, $V_{max}$ est égale à $3m/s$. La valeur du $DISC = 1.0$ n'est pas atteinte pour des valeurs inférieures à $3m/s$. Il y a donc un risque que l'indice d'inconfort ne soit pas dans la gamme que nous nous sommes fixés dans ce volume.

La représentation du pourcentage de volume confortable apporte plus d'informations quant au confort dans le cube. Cette représentation est donnée sur la figure 12.

La figure 12 représente le pourcentage de volume confortable présent dans la pièce. Ces valeurs de pourcentage sont utilisés uniquement pour optimiser la ventilation.

Les heures étudiées sont comprises entre $11h$ et $23h$. Les pourcentages calculés sont très différents notamment entre $15h$ et $17h$. La figure 12, permet de constater que l'inconfort est important dans la partie basse du cube

à cause du vent. En effet, le vent est en moyenne plus important en partie basse que la vitesse moyenne calculée pour $0.2 < z < 2.2$.
Le pourcentage calculé à partir du volume global est supérieur à celui calculé pour le volume proche du sol. La variation des valeurs des pourcentages est uniquement due au variations de vitesses dans le cube. Donc pour tenter d'améliorer le confort thermique, il faut modifier le type d'ouvrant. Cette modification peut porter sur deux aspects :

- réduction de la taille des ouvrants ;
- ajout de jalousies pour diminuer les vitesses dans la partie basse du cube.

Cette modification permet de moduler la vitesse du vent à cette hauteur.

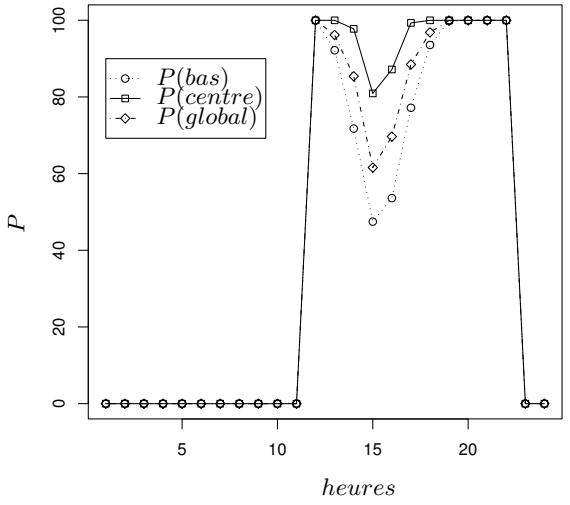


Figure 12 : Pourcentages dans trois volumes différents

CONCLUSIONS

La méthodologie utilisée sert à modéliser le vent à l'intérieur d'un bâtiment suivant des couches horizontales. Les modèles simplifiés générés à partir de la mécanique des fluides numérique permettent d'obtenir rapidement des résultats lors de l'étude horaire du comportement thermique des bâtiments.
Couplés aux indices de prédiction de confort et d'inconfort, ils permettent de définir des prescriptions concernant l'optimisation des ouvrants, et l'optimisation de l'enveloppe, et surtout de donner une information sur la qualité de l'ambiance thermique.
D'autres aspects sont actuellement en cours de traitement visant à généraliser la méthode à d'autres types de bâtiments et d'autres configurations d'ouvrants, et à évaluer des indices de confort adaptés au climat tropical humide. Une expérimentation est en cours ayant pour objectif de valider les distributions cumulées d'amplitudes de vitesses et les différents coefficients des modèles.

RÉFÉRENCES


[1] Ernest D.R., F.S. Bauman, and E.A. Arens. The prediction of indoor air motion for occupant cooling in naturally ventilated buildings. *ASHRAE Transactions*, 97 :539–552, 1991.

[2] Gouin G. *Contribution Aerodynamique à l'Etude de la Ventilation Naturelle des Habitats en Climat Tropical Humide.* Thèse, Université de Nantes, 1984.

[3] Sangkertadi. *Contribution à l'Etude du Comportement Thermoaéraulique des Bâtiments en Climat Tropical Humide. Prise en Compte de la Ventilation Naturelle dans l'Evaluation du Confort.* Thèse, INSA Lyon, 1994.

[4] Kindangen J., G. Krauss, and P. Depecker. Effect of roof shapes on wind-induced air motion inside buildings. *Building and Environment*, 32 :1–11, 1997.

[5] Gagge A., Fobelets P., and Berglund L. A standard predictive index of human response to the thermal environnement. *ASHRAE Transactions*, 92 :709–731, 1986.

[6] Doherty T. and Arens E. Evaluation of physiological bases of thermal comfort models. *ASHRAE Transactions*, 94 :1371–1385, 1988.

[7] StarCD. *v3.15 Methodology*. © 1999 Computational Dynamics Limited.

[8] B.E. Launder and D.B. Spalding. The numerical computation of turbulent flow. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3 :269–289, 1974.

[9] Orszag SA. Yakhot V. Renormalisation group analysis of turbulence. I. Basic Theory. *Journal of Scientific Computing*, 1 :1–51, 1986.

[10] W. Rodi. Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 69-71 :55–75, 1997.

[11] Counihan J. Adiabatic atmospheric boundary layers : a review and analysis of data from the period 1880-1972. *Atmospheric Environnement*, 9 :871–905, 1975.

[12] Cermak J.E., M. Poreh, J.A. Peterka, and S.S. Ayad. *Wind tunnel investigations of natural ventilation.*, volume 82-519. American Society of Civil Engineers, New Orleans, LA, 1982.

[13] Free Software Foundation. *GNU Scientific Library, a collection of numerical routines for scientific computing*. http ://www.gnu.org/software/gsl.

[14] M. Wall. *GAlib : A C++ Library of Genetic Algorithm Components*. Massachusetts Institute of Technology, 1996.

[15] Boyer H., Lauret AP., Adelard L., and Mara T. Building ventilation : a pressure airflow model computer generation and elements of validation. *Energy and Buildings*, 29 :283–292, 1999.